INVESTIGACION y CIENCIA

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

ANTIMATERIA, NUDO GORDIANO DE LA ASTROFISICA

ASI ESCOGE MACHO LA HEMBRA

INFORME ESPECIAL: TELECOMUNICACIONES PARA EL SIGLO XXI



JUNIO 1998
800 PTAS.



Junio de 1998 Número 261

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

SECCIONES



Portada: David Fierstein; cortesía de Angel Technologies

PROCEDENCIA DE LAS ILUSTRACIONES

Página	Fuente
6-8	Alfred T. Kamajian
9	Georgia deNolfo (*arriba*); Laurie Grace (*abajo*)
10-11	Alfred T. Kamajian
12-14	Tomo Narashima
16	Johnny Johnson
17	March of Dimes Birth Defects Foundation
18	UPI/Corbis-Bettmann
20-23	Brian J. Ford (*fotografías*); Richard Jones (*dibujos*)
34-36	Roberto Osti
37	Roberto Osti (*dibujos*), Jennifer C. Christiansen (*diagrama*)
38	Erwin y Peggy Bauer (*arriba, izquierda*); David C. Fritts (*arriba, derecha*); M. Austerman (*abajo, izquierda*) y Lara Jo Regan (*abajo, derecha*)
39	Jennifer C. Christiansen
40-41	Tomo Narashima
42	Michael W. Berns (*arriba*), Hamid Ghanadan (*abajo*)
43	Hamid Ghanadan; fuente: Arthur Ashkin, Laboratorios AT&T Bell
44	Xunbin Wei, Instituto Beckman del Láser
45	Michael W. Berns
47-54	Manuel Perucho
58-59	Slim Films
60-61	Bryan Christie
62-65	Slim Films
68-69	Slim Films
71	Ico Global Communications; Slim Films
72-73	Slim Films
74-75	Dusan Petricic
76-81	Slim Films
82	Kobal Collection; U.S. Patent Office (*inserto*)
83-85	Slim Films
86-87	Ian Worpole
88-89	Laurie Grace
90	Alan Bennett
91	Dusan Petricic

COLABORADORES DE ESTE NUMERO

Asesoramiento y traducción:

Juan Pedro Campos: *Antimateria cósmica*; Esteban Santiago: *Síndrome post-polio*; Ricardo Martínez Murillo: *Las primeras observaciones*; Joandomènec Ros: *Así eligen pareja las hembras*; Montserrat Elías: *Tijeras y pinzas de láser*; Luis Bou: *Redes inalámbricas terrestres* y *Juegos matemáticos*; Angel Garcimartín: *Perfiles*; J. Vilardell: *Más allá de los sistemas de voz inalámbricos, Radio de espectro disperso*, *Hace...* y *Taller y laboratorio*; José M.ª Valderas Martínez: *Nexos*

SUSCRIPCIONES

Prensa Científica S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono (93) 414 33 44
Fax (93) 414 54 13

Precios de suscripción, en pesetas:

	Un año	Dos años
España	8.800	16.000
Extranjero	11.150	20.700

Ejemplares sueltos:

Ordinario: 800 pesetas
Extraordinario: 1.000 pesetas

—El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.

DISTRIBUCION

para España:

MIDESA
Carretera de Irún, km. 13,350
(Variante de Fuencarral)
28049 Madrid Tel. (91) 662 10 00

para los restantes países:

Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª – 08021 Barcelona
Teléfono (93) 414 33 44

PUBLICIDAD

GM Publicidad
Francisca Martínez Soriano
Menorca, 8, semisótano, centro, izquierda.
28009 Madrid
Tel. (91) 409 70 45 – Fax (91) 409 70 46

Cataluña y Baleares:
Miguel Munill
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona
Tel. (93) 321 21 14
Fax (93) 414 54 13



ISSN 0210136X Dep. legal: B. 38.999 – 76

Filmación y fotocromos reproducidos por Dos Digital, Zamora, 46-48, 6ª planta, 3ª puerta - 08005 Barcelona
Imprime Rotocayfo, S.A. Ctra. de Caldes, km 3 - Santa Perpètua de Mogoda (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España

HACE...

...cincuenta años

REVISIÓN ANTIFUNGICIDA. «En 1944 se creía que la histoplasmosis era rarísima; hasta el nombre desconocían la mayoría de los médicos. Sin embargo, de entonces para acá se ha venido empleando con frecuencia en un nuevo análisis dermatológico sobre millares de estudiantes de enfermería. El resultado fue asombroso: casi un cuarto de la totalidad de los alumnos dieron una reacción positiva. Se cree ahora que hay millones de americanos afectados. Sobre tan ominoso hongo se sabe poco. El *Histoplasma capsulatum* se presenta en dos variedades naturales: una, inocua; la otra, parasitaria y responsable de la histoplasmosis humana. Se supone que este segundo tipo es transmitido por insectos, pero se desconoce el mecanismo de su propagación.» (*Nota de la redacción: El hongo está asociado con excrementos de aves o murciélagos.*)

LA VEJEZ. «Durante los últimos diez años el interés científico por el envejecimiento ha cobrado impulso. El interés se suscita en momentos oportunos, ya que la artritis, la nefritis, las enfermedades cardiovasculares y trastornos similares se han convertido en un problema tremendo. A medida que la medicina cobra eficacia creciente en el tratamiento de las enfermedades de la infancia y la madurez, el porcentaje de población con edades avanzadas aumenta sin cesar. Hasta qué punto puede hacerse retroceder la decadencia y la muerte natural sigue siendo cuestión debatida. Los fisiólogos más prudentes admiten que la salud y el vigor pueden durar hasta una edad de cien años. Los entusiastas rusos, que han estado sondeando los secretos de la edad con particular ahínco, ponen el límite más allá de los 150 años.»

...cien años

LICUACIÓN DEL HIDRÓGENO. «El profesor Dewar recientemente ha licuado el hidrógeno, hazaña sin precedentes. Ya se han publicado relatos más completos de sus experimentos. En el aparato empleado, el hidrógeno se enfría hasta –205 ºC a una presión de 180 atmósferas, y se descarga por un serpentín con un caudal entre 300 y 425 litros por minuto dentro de un recipiente de vacío. Desde éste cae, en estado líquido, a otro recipiente de vacío y en unos cinco minutos se recoge un volumen de 20 centímetros cúbicos.»

LA ATMÓSFERA TERRESTRE. «Haciendo que las herbáceas vegetaran en gas nitrógeno que contuviera algo de ácido carbónico, llegué a convencerme de que eran esencialmente anaerobias, que pueden vivir sin oxígeno libre, que son el medio por el cual la naturaleza proveyó a la atmósfera de oxígeno libre y que conforme la composición del aire cambió gradualmente, oxigenándose más con el transcurso de los siglos, aparecieron la plantas aerobias y los animales. Al introducir una hierba de la moneda (*Lysimachia nummularia*) en agua dentro de una campana de vidrio rellena de nitrógeno con un poco de ácido carbónico, al cabo de pocos meses se comprobará que la atmósfera de la campana es aún más rica en oxígeno que la atmósfera exterior.

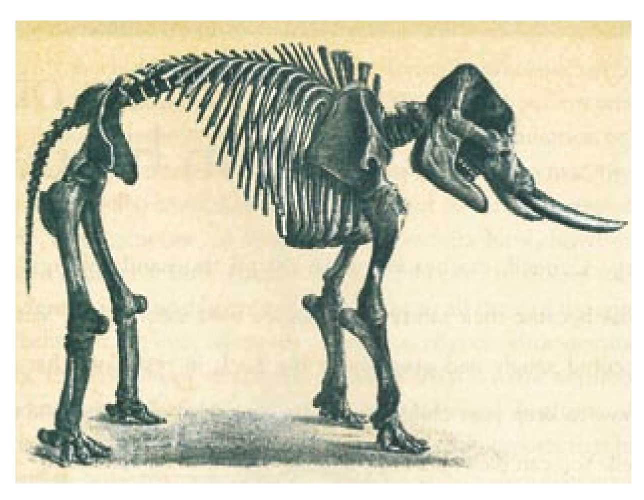
—Thomas L. Phipson»

ENFERMEDADES PORCINAS. «Por fin se está comprendiendo el peligro de los mataderos entendidos como agentes de propagación de infecciones. Ch. Wardell Stiles, médico, en un artículo publicado en 1896, afirma: "Cuando los despojos de un cerdo con triquinosis se dan de comer a cerdos criados en el campo, éstos no pueden salvarse de la infección triquinoidea. Todo matadero es un foco de enfermedades para los alrededores, propagando la triquinosis, la equinocosis, la modorra, la solitaria y otros males debidos a los parásitos de los animales, así como la tuberculosis, la peste porcina y otras enfermedades bacterianas." Por ello, recomienda: (a) prohibir la alimentación de animales con despojos; (b) mejora de desagües y alcantarillas; (c) desratización, y (d) prohibir la entrada de perros en los mataderos.»

UN ESQUELETO DE MASTODONTE. «En 1866, al limpiar un terreno para establecer las Tejedurías Harmony, en Cohoes (Nueva York), se descubrió una enorme cavidad. Parecía una ciénaga, como muchas grandes charcas de montañas cubiertas de musgo flotante que no tienen salida porque están en un cuenco de roca. Al excavar se descubrieron los restos de un mastodonte a más de quince metros bajo la superficie. Evidentemente, en tiempos prehistóricos, la enorme bestia cayó en el agujero, pues éste es de casi diez metros de diámetro. Los huesos de tan gran ejemplar se exponen actualmente en el Museo de Geología del estado de Nueva York.»

...ciento cincuenta años

LA PRIMERA DAMA. «Miss Maria Mitchell, de Nantucket, descubridora del cometa que lleva su nombre, fue elegida unánimemente miembro de la Academia Americana de Artes y Ciencias, en la última reunión de ésta. Creemos que es la primera vez que ese honor recae en una dama en nuestro país. En Europa un honor similar ha sido concedido sólo a dos damas; a Miss Caroline Herschell, hermana y ayudante del difunto Sir William Herschell, el astrónomo, y a Mrs. Mary Fairfax Somerville, comentarista de la *Mecánica celeste* del marqués de La Place.»



Esqueleto de mastodonte procedente de un pantano del estado de Nueva York

Antimateria cósmica

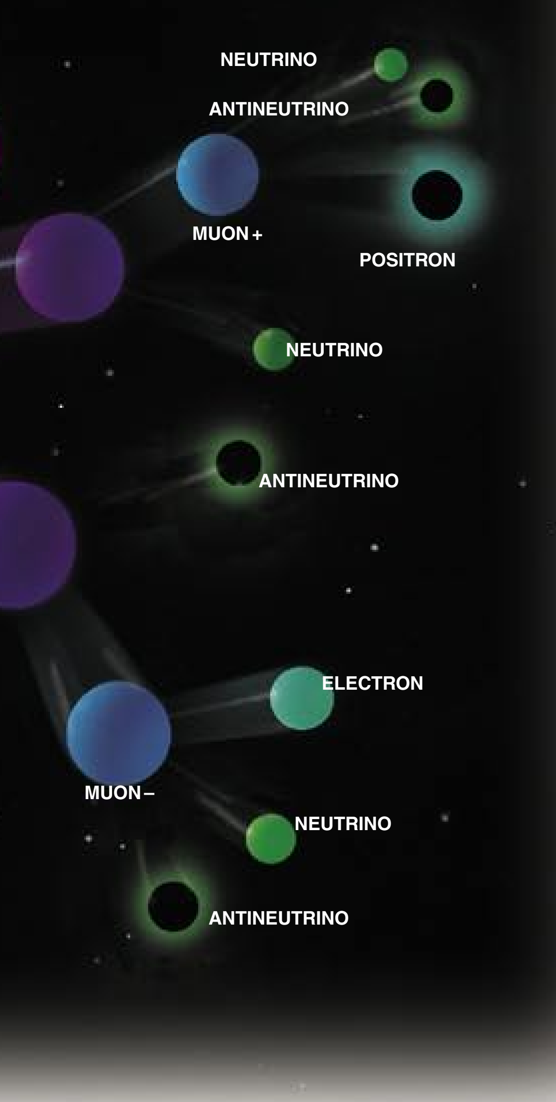
Las antipartículas, aunque escasas y huidizas, podrían encerrar la explicación de algunos misterios astrofísicos

Gregory Tarlé y Simon P. Swordy

1. LAS VIOLENTAS COLISIONES de los protones acelerados por el frente de choque de una supernova crean buena parte de la antimateria que se observa. Algunas colisiones producen cascadas de positrones, electrones y otras partículas (*arriba*); los impactos más potentes generan antiprotones (*abajo*).

El físico Paul Dirac predijo en 1928 la existencia de la antimateria; por cada tipo de partícula de la materia ordinaria, avanzó, hay una de la misma masa y carga contraria. Esas antipartículas podían unirse y formar átomos, que a su vez crearían los análogos antimateriales de los objetos del universo: antiestrellas, antigalaxias, hasta antipersonas. Más aún, una partícula y una antipartícula que chocasen se aniquilarían y en su lugar habría una erupción de rayos gammas de gran energía. Una persona y una antipersona que se diesen la mano producirían una explosión equivalente a 1000 detonaciones nucleares de un megatón, suficiente cada una para destruir una ciudad.

Era una idea extraordinaria, que se confirmó cuatro años después cuando Carl D. Anderson, del Instituto de Tecnología de California, detectó la primera antipartícula. En la cámara de niebla con la que estudiaba los rayos cósmicos —las partículas de gran energía que bombardean la Tierra desde el espacio exterior— observó un rastro de vapor creado por una partícula que tenía la misma masa que el electrón, aunque de carga



contraria (es decir, positiva); se la llamó positrón, y era la antipartícula del electrón. Dar con los antiprotones costó más, pero en 1955 fueron creados en un acelerador de partículas del laboratorio Lawrence de Berkeley; en el CERN, el laboratorio europeo de física de partículas cercano a Ginebra, se sintetizaron en 1995 efímeros átomos de antihidrógeno ligando protones y antiprotones en un acelerador de partículas.

En los últimos años se han construido detectores muy depurados que buscan antimateria en los rayos cósmicos. Como éstos se destruyen al chocar con los núcleos de las moléculas del aire, se han mandado detectores a los confines menos densos de la atmósfera. Hemos participado en uno de esos experimentos, el Telescopio de Antimateria de Gran Energía (su acrónimo en inglés es HEAT, "calor"), instalado en globos a gran altura para detectar los positrones de los rayos cósmicos. Otros detectores aerostáticos observan antiprotones. Se están proyectando rastreos de la antimateria más ambiciosos: vuelos más largos de los globos, así como detectores puestos en órbita. Estos experimentos dirían mucho de los orígenes de la antimateria, y quizá nos indicasen si hay o no antiestrellas y antigalaxias.

GREGORY TARLE y SIMON P. SWORDY llevan investigando en rayos cósmicos desde hace más de 20 años. Tarlé enseña física en la Universidad de Michigan; Swordy, en la de Chicago.

Se cree que la mayoría de las antipartículas observadas en la atmósfera superior surgieron de colisiones violentas de partículas subatómicas en el espacio interestelar. El proceso empieza cuando los campos magnéticos de la onda de choque de una explosión de supernova aceleran un protón interestelar o un núcleo atómico más pesado hasta velocidades enormes. Si este núcleo —ahora un rayo cósmico de gran energía— choca con otra partícula interestelar, parte de la energía del rayo cósmico puede convertirse en un par partícula-antipartícula.

Algunas colisiones producen pares de piones, partículas inestables que se desintegran enseguida en positrones, electrones, neutrinos y antineutrinos. Los choques de mayor energía, cuando las partículas se mueven casi a la velocidad de la luz, producen parejas de protones y antiprotones; es el proceso inverso al de la aniquilación de la materia y la antimateria: la energía se hace materia.

El número de antipartículas producidas por las colisiones interestelares es discreto. Las partículas abundan mucho más que las antipartículas en los rayos cósmicos que observa HEAT. Para entender por qué es difícil detectar antimateria imaginémonos un cubo lleno de tuercas. La rosca de 100 de ellas, que representan los electrones de carga negativa, gira a derechas, y la de 10 a izquierdas (los positrones). En los rayos cósmicos también hay protones, que tienen como los positrones carga positiva, sólo que su masa es mucho mayor. Representaremos los protones con 10.000 tuercas a izquierdas, pero más pesadas. Hay que pesar cada tuerca a izquierdas para ver si es protónica o positrónica; la pesada ha de ser muy precisa. Basta que sólo una tuerca protónica de cada 1000 se tome por una positrónica para duplicarse el número aparente de éstas.

El porcentaje de errores de HEAT es inferior a uno en 100.000. Identifica los positrones con un imán superconductor y un conjunto de detectores. Una vez los rayos cósmicos se han precipitado por una apertura colectora, el imán superconductor desvía los electrones, negativos, hacia una parte y los positrones y los protones, positivos, hacia la otra. Los detectores miden la carga y la dirección de cada partícula incidente y la magnitud de la desviación que sufre en el campo magnético. Esta última medición sirve para distinguir entre protones y positrones; el protón, más pesado, se moverá en una línea más recta que un positrón de la misma velocidad.

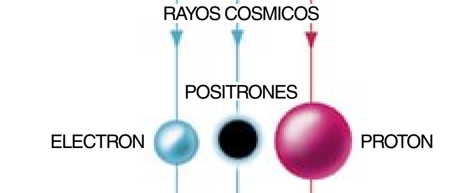
Aunque pesa unos 2300 kilogramos, HEAT subió en 1994 desde Nuevo México a 37.000 metros de altura, por encima del 99,5 por ciento de la atmósfera, gracias a un globo gigante de helio de la NASA. Allí midió los rayos cósmicos durante 32 horas y regresó al suelo con paracaídas; aterrizó en el Panhandle de Texas. La NASA lo lanzó de nuevo en 1995, desde Manitoba. Esta vez observó positrones de menor energía, que penetran en el campo magnético de la Tierra sólo cerca de los polos magnéticos norte y sur.

Fueron muy interesantes los resultados de estos dos vuelos. El número de positrones de baja energía registrados por HEAT era muy próximo al que se anticipaba a partir de las colisiones interestelares. Sin embargo, se encontraron más positrones de energía elevada que los esperados. La cifra no era especialmente grande y pudo deberse a errores difíciles de percibir; pero si fuera real ello implicaría que hay por descubrir una fuente de positrones de gran energía en el cosmos. Podría ser la supuesta "partícula de interacción débil y masa grande", o WIMP.

Esta partícula hipotética es una solución plausible del problema de la "materia oscura". Para explicar las velocidades de rotación de las galaxias, se cree que éstas se hallan inmersas en un enorme halo de materia oscura que no puede observarse por los medios ordinarios. La hipotética WIMP sería una buena modalidad de materia oscura, pues no desprende luz ni ninguna otra forma de radiación electromagnética. Si existiesen las WIMP y con la densidad predicha, las colisiones entre ellas producirían un número considerable de positrones de gran energía. Este proceso podría explicar la cantidad sobrante detectada por HEAT. Pero antes de pronunciarse con fundamento hará falta que nuevas mediciones efectua-

El detector de altura

Un globo de helio eleva el Telescopio de Antimateria de Gran Energía (HEAT) hasta la atmósfera superior (*abajo*). Una vez los rayos cósmicos se han precipitado por la apertura colectora del instrumento, la batería de detectores identifica los positrones. Uno de los autores (Tarlé) posa con el HEAT tras su primer vuelo (*página siguiente*).



das por HEAT o por otros detectores confirmen nuestras observaciones con una precisión mayor.

Si nosotros hemos perseguido los positrones de los rayos cósmicos, otros han buscado una presa aún más escurridiza: el antiprotón. Es más raro que el positrón porque pesa casi 2000 veces más; por eso hace falta mucha más energía para crearlo. Los protones interestelares deben chocar a velocidades de más del 99 por ciento de la velocidad de la luz para producir una pareja de protón y antiprotón.

El Experimento de Isótopos de Materia y Antimateria (IMAX) y el Experimento del Espectrómetro Solenoidal Superconductor Aerostático (BESS), dos detectores de antimateria, han encontrado una concentración máxima de sólo un antiprotón por cada 10.000 protones en la lluvia de rayos cósmicos. La escasez obliga a tener la máxima precaución en no tomar lecturas falsas. A sus detectores debe exigírseles extrema sensibilidad con un porcentaje de errores inferior a uno en un millón.

Luis W. Alvarez efectuó en los años sesenta el primer rastreo de fragmentos mayores de antimateria cósmica. Empezó por las antipartículas pesadas, núcleos de antihelio, de anticarbono o de antioxígeno, que pudiera haber en los rayos cósmicos. Al contrario que los positrones y los antipositrones, esas antipartículas grandes son demasiado pesadas para que se produzcan en choques entre partículas interestelares. Si se descubriese un núcleo de antihelio querría decir que alguna antimateria sobrevivió tras la gran explosión inicial ("big bang"). Y la detección de un núcleo de anticarbono o de antioxígeno revelaría la existencia de antiestrellas, porque el carbono y los elementos más pesados se crean sólo en las estrellas.

Los astrofísicos, en general, se muestran escépticos sobre la existencia de antiestrellas. Aunque su luz sería igual a la de una estrella corriente, chocarían irremediablemente con las partículas de la materia ordinaria que fluyesen hacia ellas desde el espacio interestelar. La consiguiente aniquilación de la materia y la antimateria generaría un flujo ingente de rayos gamma. Los detectores orbitales han detectado rayos gamma de baja energía que señalan la aniquilación de un surtidor inmenso de positrones que, al parecer, se extiende desde el centro de nuestra galaxia. No se cree que lo



La sección *a* muestra el detector de transición por radiación, una serie de seis capas de fibra de polietileno. Los positrones y los electrones generan rayos X a medida que atraviesan las capas; en cambio los protones de la misma energía producen una señal mucho más débil.

La sección *b* muestra el espectrómetro magnético, que desvía los rayos cósmicos con un imán superconductor. Los electrones se inclinan hacia un lado y los protones y los positrones hacia el opuesto. Se pueden distinguir los protones y los positrones porque éstos se curvan más que aquéllos para una misma velocidad.

La sección *c* muestra el calorímetro electromagnético, una pila de placas de plástico y finas capas de plomo. Cuando los electrones dan en éstas, producen cascadas de partículas que generan destellos de luz en las placas de plástico. La mayoría de los protones atraviesa la sección sin más.

haya producido una antiestrella, que se manifestaría como una fuente intensa y concentrada de rayos gamma de mucha mayor energía. Ningún detector ha observado una fuente así; no debe de haber, pues, antiestrellas en nuestra galaxia, y un razonamiento similar indica que tampoco hay antigalaxias en el cúmulo galáctico local.

¿Y más lejos? Quizá contenga el universo antigalaxias solitarias, separadas de las galaxias por distancias inmensas. En los diez últimos años se ha investigado a fondo la distribución de las galaxias hasta distancias de mil millones de años luz y no se han descubierto regiones de las que quepa concebir que estén hechas de antimateria, sino una red de cúmulos galácticos que rodean grandes espacios vacíos, a la manera de un ingente baño de burbujas. Si hubiera grandes zonas de antimateria en el universo, las regiones donde se solapasen la materia y la antimateria habrían producido enormes cantidades de rayos gamma en los primeros tiempos del universo. No se ha detectado ese potente resplandor de fondo. Si hay antigalaxias, es que están más allá del alcance de nuestros mejores telescopios, o al menos a varios miles de millones de años luz.

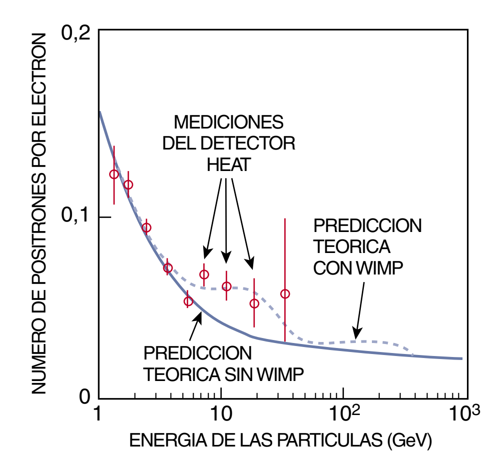
Más aún: la cosmología moderna da una razón en pro de un universo compuesto, casi por entero, de materia corriente. Según las teorías más aceptadas, la gran explosión inicial produjo un poco más de materia que de antimateria en el primer instante de la creación a causa de una ligera asimetría de las leyes de la física, la violación CP, que se ha observado en el laboratorio. Por cada 30.000 millones de partículas de antimateria creadas durante la gran explosión se hicieron 30.000 millones y una de materia. Alrededor de una millonésima de segundo tras la gran explosión, las partículas empezaron a aniquilarse con las antipartículas hasta que de unas y otras sólo quedaron las de materia que había de más. Ese pequeño excedente —con todo un número vasto de partículas— vino a ser el universo que conocemos.

Aunque esta teoría parece convincente, algunos han seguido buscando antipartículas pesadas. Siguen creyendo en extensas regiones de antimateria, que los antinúcleos pesados que se muevan a velocidades cercanas a la de la luz podrían cruzar la inmensa distancia que las separa de nuestra galaxia. Alvarez y otros instalaron en los años sesenta y setenta detectores que analizaron decenas de miles de impactos de rayos cósmicos para determinar si alguno se debía a antipartículas pesadas. En experimentos más recientes se han escrutado millones. Pero no ha aparecido antipartícula alguna más pesada que el antiprotón.

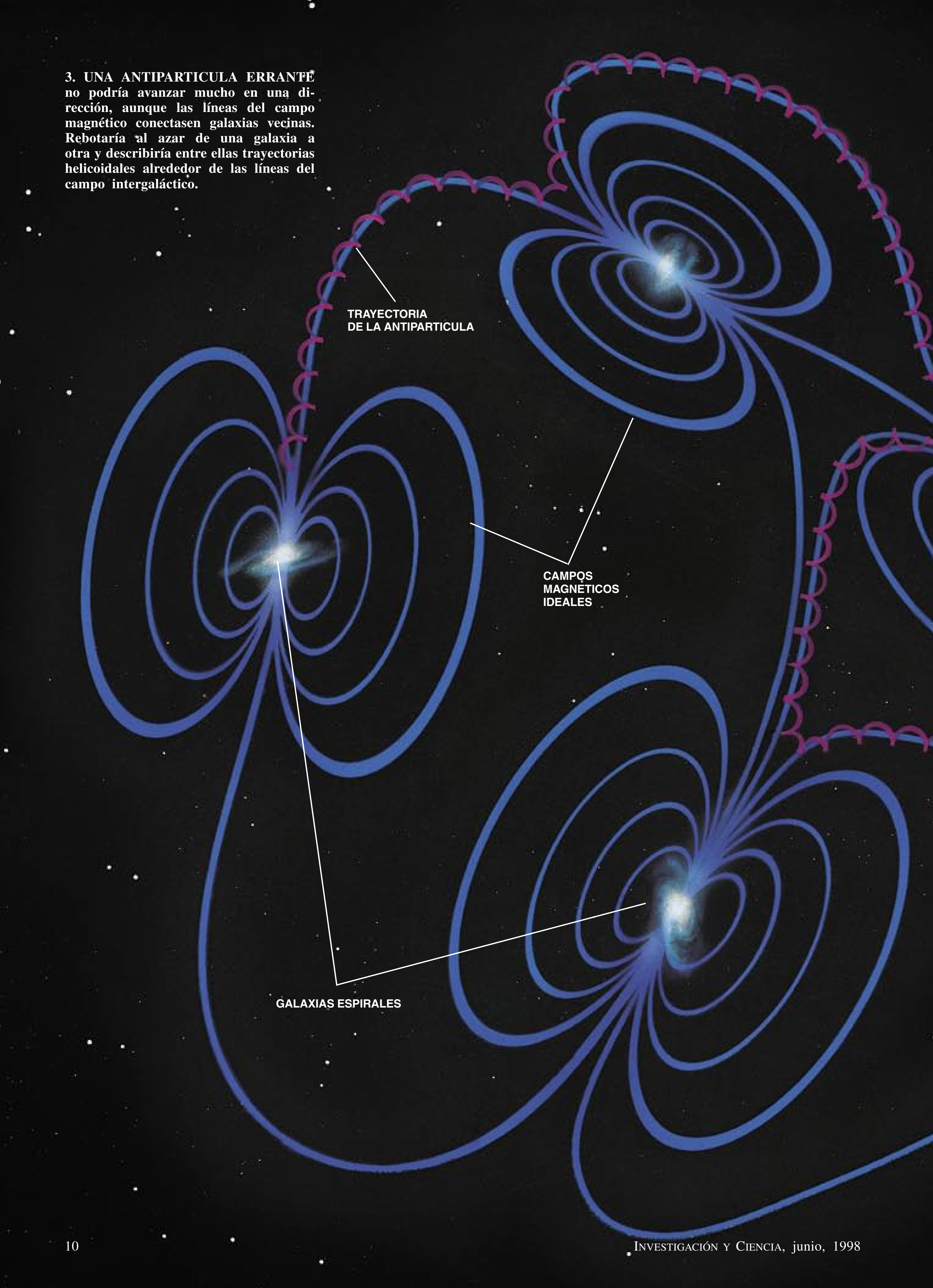
Es concebible que las antigalaxias lejanas emitiesen antipartículas pesadas y los campos magnéticos del espacio intergaláctico impidieran que llegasen a la Tierra. Las mediciones de la radiación de sincrotrón que atraviesa los cúmulos galácticos han mostrado que la intensidad del campo magnético en el interior de éstos es alrededor de una millonésima de la que tiene en la superficie terrestre. Puesto que esos campos podrían intensificarse mil veces durante la formación de los cúmulos, la intensidad del campo entre galaxias muy separadas sería sólo una milmillonésima de la que tiene en la Tierra.

Ese campo, demasiado débil para mover la aguja de una brújula, con el tiempo alteraría la trayectoria de una antipartícula que atravesase las inmensas distancias del espacio intergaláctico y haría que girase helicoidalmente, con un diámetro de sólo unos años luz, alrededor de una línea del campo magnético. No hay acuerdo acerca de la orientación de los campos magnéticos del espacio intergaláctico. Unos los suponen ordenados, como el que rodea un imán corriente. Para otros, sus líneas están enmarañadas inextricablemente. Si los segundos aciertan, las antipartículas no podrían ir muy lejos con una misma dirección. Rebotarían al azar enredadas en la maraña de las líneas del campo, como el borracho que intenta ir del bar a su casa, distante 10 kilómetros. Una persona sobria iría en línea recta y llegaría en un par de horas. Pero el borracho va dando tumbos al azar y avanza poco. No llegaría a casa ni en un año.

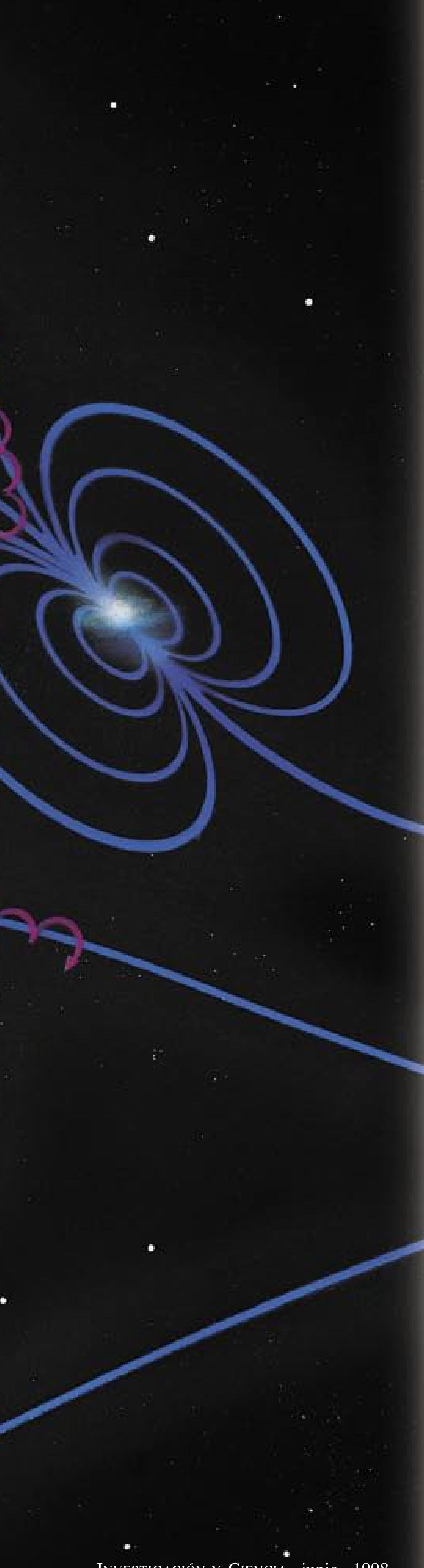
Si, por contra, el campo magnético intergaláctico es coherente, cabría que las líneas del campo se extendiesen de una galaxia a otra. En esas condiciones las antipartículas se canalizarían entre las galaxias vecinas por carreteras cósmicas de millones de años luz de largo. No viajarían en línea recta; saltarían de una galaxia a otra, como si al borracho lo llevasen de una esquina a otra y, no obstante, siguiese avanzando poco porque se moviera errático en los cruces. Las antipartículas sólo podrían recorrer



2. SOBRANTE de positrones de gran energía observado por HEAT. El exceso podría apuntar a otra fuente de antimateria, la hipotética partícula de interacción débil y masa grande, o WIMP.



3. UNA ANTIPARTICULA ERRANTE no podría avanzar mucho en una dirección, aunque las líneas del campo magnético conectasen galaxias vecinas. Rebotaría al azar de una galaxia a otra y describiría entre ellas trayectorias helicoidales alrededor de las líneas del campo intergaláctico.



unos cientos de millones de años luz desde su punto de partida aunque se les diese toda la edad del universo para hacer el viaje; esa distancia es más corta que los miles de millones de años luz a los que estaría la antigalaxia más cercana que pudiera haber.

Pese a todo, si con una tenacidad prodigiosa una antipartícula se acercase a nuestra galaxia, tampoco llegaría a la Tierra. El campo magnético, mucho más intenso en el interior de la galaxia que a extramuros de la misma, desviaría las partículas que se dirigiesen hacia su interior. El borracho llega por fin a casa, pero no encuentra la llave.

Parece improbable que se hallen alguna vez antipartículas pesadas en nuestra propia galaxia. No obstante, el rastreo sigue. El departamento de energía de los Estados Unidos ha patrocinado un proyecto encaminado a poner un detector de antimateria en órbita, el Espectrómetro Magnético Alfa (AMS), cuyo objetivo primario es la búsqueda de núcleos de antimateria pesados. La NASA piensa ensayar el AMS en el transbordador espacial el año en curso. De acuerdo con lo proyectado, el AMS volará con la Estación Espacial Interplanetaria durante tres años a partir de principios del 2002.

Con un tiempo de exposición tan dilatado, la sensibilidad del AMS podría, en principio, centuplicar la de los anteriores detectores de antimateria. El verdadero problema será garantizar que la precisión con la que discrimine entre las partículas y las antipartículas lo permita. Para identificar una antipartícula pesada en un fondo de 100 millones de partículas ha de determinar correctamente la desviación de cada partícula en un campo magnético. Los instrumentos más exactos instalados en globos hacen 15 o más mediciones para determinar la desviación de las partículas incidentes. El AMS sólo hará seis.

Está previsto que se lance en el año 2000, desde el centro ruso espacial de Baikonur, otro artefacto, PAMELA, que observará en órbita la antimateria cósmica y buscará tanto positrones y antiprotones como antinúcleos pesados por medio de un sistema más depurado que el del AMS. De talla menor recogerá menos rayos cósmicos; quizá, pues, no pueda efectuar una búsqueda exhaustiva de antipartículas pesadas.

Se avizoran más investigaciones sobre la antimateria cósmica realizadas con globos. Nosotros, por ejemplo, estamos construyendo una nueva versión del detector HEAT que busque antiprotones de gran energía. Esperamos mejorar nuestras mediciones aumentando el tiempo que el detector permanezca en el cielo. La NASA ha lanzado globos de gran altura en la Antártida que pueden volar de 10 a 20 días en círculo alrededor del polo sur. Y el equipo suborbital de la isla Wallops, de la NASA, está preparando nuevos tejidos ligeros para los globos con los que se podría volar hasta 100 días. En unos meses debería haber vuelos de prueba de globos construidos con estos materiales.

La búsqueda de la antimateria cósmica ha dado muchas vueltas. Los primeros experimentos se realizaron por un ansia de simetría, por las ganas de probar que había las mismas cantidades de materia y antimateria en el universo, pero los resultados demostraron una asimetría general. Los detectores de antimateria han encontrado muy pocos positrones y antiprotones en los rayos cósmicos y ni una sola antipartícula pesada. Puede que pese a todo haya ocultas antiestrellas y antigalaxias en algún lugar del universo, a miles de millones de años luz de nuestra galaxia, pero no sería probable que las antipartículas pesadas de esas regiones distantes llegasen a la Tierra; buscarlas quizá sea una tarea sin sentido. No obstante, la búsqueda de positrones y antiprotones podría contribuir al descubrimiento de la naturaleza de la materia oscura, uno de los grandes misterios de la astrofísica.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

THE EARLY UNIVERSE. Edward W. Kolb y Michael S. Turner. Addison-Wesley, 1990.

RAYOS CÓSMICOS EN LAS FRONTERAS DE LA ENERGÍA. James W. Cronin, Thomas K. Gaisser y Simon P. Swordy en *Investigación y Ciencia*, marzo de 1997.

CONSTRAINTS ON THE INTERGALACTIC TRANSPORT OF COSMIC RAYS. Fred C. Adams et al., en *Astrophysical Journal*, vol. 491. págs. 6-12; 10 de diciembre de 1997.

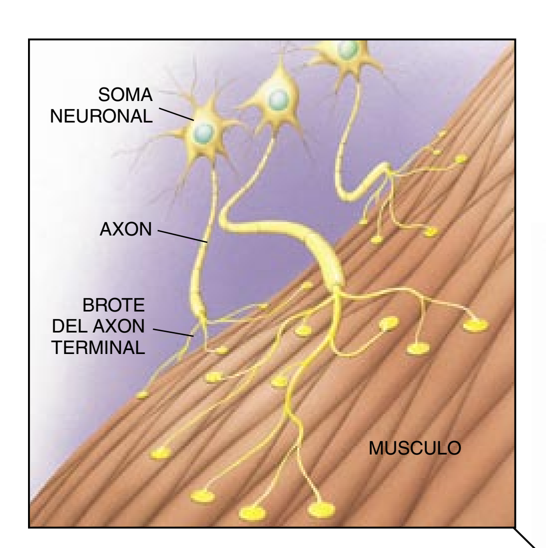
Se puede encontrar en Internet información sobre HEAT en http://tigger.physics.lsa.umich.edu/www/heat/heat.html.

Se puede encontrar en Internet información sobre AMS en http:/ /hpl3sn05.cern.ch:8080/ams01.html.

Síndrome post-polio

Largos años después de haber recuperado la fuerza muscular, quienes sobreviven a la parálisis por poliomielitis se quejan de la aparición súbita de cansancio, dolor y debilidad. La causa podría estar en la degeneración de las neuronas motoras

Lauro S. Halstead



1. LAS NEURONAS MOTORAS (*amarillo, a la derecha*) que controlan los movimientos musculares voluntarios tienen su soma celular en la médula espinal y largos axones que llegan hasta grupos musculares (del brazo, por ejemplo). Ramificaciones próximas al extremo terminal de cada axón inervan las células musculares una a una (*arriba*). Algunas neuronas motoras infectadas por el virus de la poliomielitis sobreviven, pero otras mueren, dejando paralizadas a las células musculares (*a, página opuesta*). Las neuronas motoras recuperadas desarrollan nuevas prolongaciones en los axones (*verde*), que reinervan células musculares que quedaron huérfanas (*b*). Una neurona motora puede engendrar brotes que inerven de 5 a 10 veces más células musculares que originalmente, creando una unidad motora gigante. La adaptación no es estática: en un proceso de remodelación, la unidad motora pierde ramificaciones y genera otras nuevas (*c*). Al cabo de muchos años de estabilidad funcional, estas unidades motoras ampliadas comienzan a claudicar, produciéndose una nueva pérdida de fuerza muscular. Se han propuesto dos tipos de degeneración. Se produce una lesión progresiva cuando la regeneración normal de los brotes axonales es incapaz de mantener el ritmo de desaparición de las terminaciones defectuosas (*d*). Ocurre una lesión fluctuante cuando hay una síntesis o una liberación defectuosa del neurotransmisor acetilcolina.

En la primera mitad del siglo XX, el azote de la poliomielitis paralítica parecía imparable. Un brote fortísimo sacudió en 1916 el área de Nueva York, para ir adquiriendo proporciones epidémicas en los siguientes decenios con un aumento paralelo de su letalidad. El episodio de 1952 afectó a más de 50.000 estadounidenses, con una tasa de mortalidad del 12 por ciento. Es difícil darse cuenta hoy hasta qué punto cundió el pánico en la población. La polio se había convertido en una suerte de ángel de la muerte: las familias se encerraban en casa, las piscinas se clausuraban y se cancelaban celebraciones públicas.

Los niños, sobre todo, corrían un riesgo especial. Hasta que llegaron las vacunas que acabaron con los brotes epidémicos. Jonas E. Salk creó en 1955 la suya mediante inyección de virus muertos. Seis años después, Albert B. Sabin ideaba la vacuna oral, mediante virus vivos. A mediados de los sesenta, el número de nuevos casos de polio había descendido hasta una media de 20 anuales. Estaba ganada la batalla contra la polio. O así lo parecía.

Para el ciudadano medio, la polio había dejado de suponer una amenaza de muerte, para significar una vacuna. Desde el punto de vista médico, la polio se consideraba una afección neurológica estática, no progresiva. Tras la rehabilitación y reeducación, los que sobrevivieran a la misma podrían alcanzar una meseta de estabilidad neurológica y funcional más o menos permanente. Esa idea de la poliomielitis perduró invariable bastante tiempo.

Mas, a finales de los setenta, comenzaron a aparecer informes referentes a personas que, tras haberse recuperado de la poliomielitis paralítica, contraída muchos años antes, presentaban súbitos problemas de salud: cansancio excesivo, dolor en músculos y articulaciones, y, lo más alarmante, una nueva pérdida de fuerza muscular. No abundaba la bibliografía sobre cambios neurológicos tardíos en individuos que habían sobrevivido a la poliomielitis. Por eso, la reacción inicial de muchos médicos fue negar la realidad de los problemas. Durante algún tiempo se enfrentaron ante un cuadro de síntomas carente de tipificación. Y ya se sabe lo que sucede: si no existe un nombre, no existe la enfermedad. La denominación de la patología —aun cuando se desconozca la causa o el nombre no sea adecuado— confiere al menos un elemento de credibilidad.

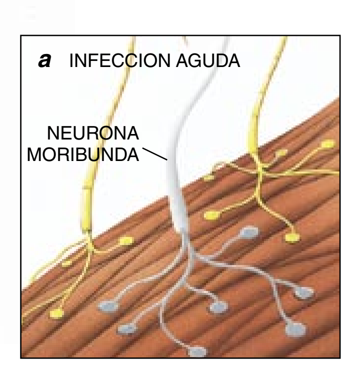
Aunque sólo fuera por la cifra creciente de casos, las personas que experimentaban los efectos retardados de la poliomielitis terminaron por atraer la atención de los médicos. A comienzos de los años ochenta se acuñaba la expresión “síndrome post-polio”, definido ahora como la afección neurológica que produce un conjunto de síntomas en individuos que muchos años antes se habían recuperado de una poliomielitis paralítica. Estos síntomas aparecen entre 30 y 40 años después de la fase aguda de la enfermedad. Las alteraciones principales consisten en una debilidad muscular progresiva con pérdida de función acompañada de dolor, sobre todo en músculos y articulaciones. Menos habituales son la atrofia muscular, problemas respiratorios, dificultades en la deglución e intolerancia al frío. Por encima de todos los demás, el síntoma crítico del síndrome post-polio es la debilidad progresiva.

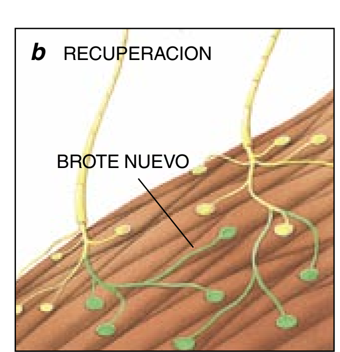
Corren un riesgo mayor de padecer el síndrome quienes han sufrido un ataque grave de poliomielitis paralítica, aunque se han dado casos de quienes experimentaron un ataque benigno. El nuevo cuadro muestra un comienzo insidioso, si bien a veces parece precipitarse a raíz de un accidente menor, una caída, un período de reposo en cama o una intervención quirúrgica. Suelen confesar que incidentes parejos ocurridos años antes no habían comportado tamaña quiebra de salud y función.

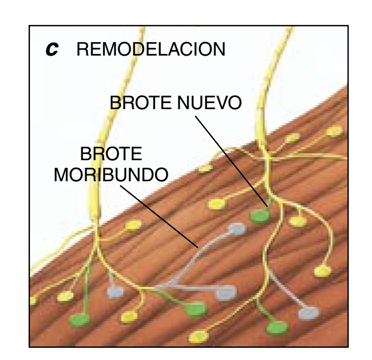
En mi propia carne se ha realizado la doble experiencia de recuperación de una polio paralítica y desarrollo del síndrome post-polio. Contraje la poliomielitis en la epidemia de 1954, de viaje por Europa al terminar mi primer curso univesitario. Tenía yo 18 años. En el duro recorrido hacia la recuperación tardé seis meses: pasé del pulmón de acero a la silla de ruedas, de ahí a una férula de pie y, por fin, a la liberación de cualquier apoyatura ortopédica. Días había en que mis fuerzas mejoraban de la noche a la mañana. Aunque mi brazo derecho quedó paralizado, el resto del cuerpo recuperó la mayor parte de la fuerza y resistencia que tenía antes de la enfermedad. Me sentía curado del todo. Volví a la universidad, aprendí a escribir con la mano izquierda e incluso jugaba al squash con cierta asiduidad. En la mañana en que se cumplía el tercer aniversario del comienzo de mi poliomielitis, coronaba la cima del monte Fujiyama, después de una ascensión de unos 4000 metros. Mientras contemplaba una espléndida salida de sol, pensaba, “he dejado atrás a la polio. La he vencido”.

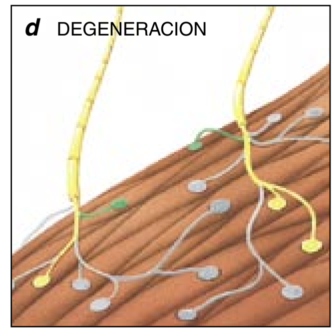
Con la conquista del Fujiyama fresca en mi mente, me fijé nuevas cimas a escalar. Me matriculé en medicina. Los años de interno y residente reclamaron singular esfuerzo físico. Pero iba saliendo adelante en la vida, mientras la poliomielitis quedaba cada vez más lejos en mi memoria. Hace unos años empecé a sentir cierta debilidad en las piernas. A medida que ésta progresaba, en cuestión de meses, pasé de ser un buen andarín y corredor empedernido (incluso escaleras arriba) a necesitar una silla motorizada.

El síndrome post-polio no es ningún fenómeno nuevo. En la historia de la medicina francesa aparece descrito en 1875, pero, como sucede a









menudo, quedó relegado en el olvido. Desde esa fecha hasta 100 años se cuentan unos 35 informes sobre la debilidad post-poliomielítica. Hacia 1984 se despierta un renovado interés por los efectos tardíos de la polio, lo que nos llevó a mí y a otros investigadores a organizar una reunión internacional en el Instituto Warm Springs de Rehabilitación, una suerte de meca para el tratamiento de la polio que fundara Franklin Delano Roosevelt en el sur de Georgia. El presidente Roosevelt quedó paralítico en 1921, a los 39 años, como consecuencia de una poliomielitis. Sintió que la natación en las aguas cálidas de un balneario termal fortalecía su musculatura, y en 1926 compró allí un hotel y lo convirtió en una fundación sin ánimo de lucro.

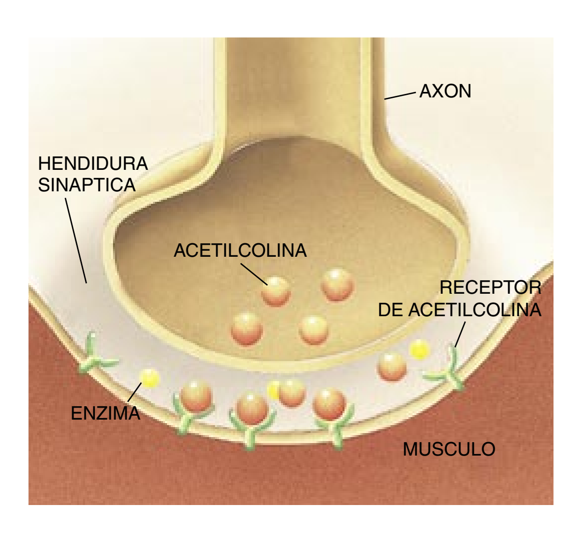
En el Instituto de Warm Springs se celebró también la segunda reunión internacional sobre el síndrome en 1986. Con los años la investigación básica y clínica sobre los efectos tardíos de la poliomielitis ganó un notable brío. En 1994 la Academia de Ciencias de Nueva York y el Instituto Nacional de Sanidad organizaron otra reunión internacional que culminó con la publicación de un número especial de *Annals of the New York Academy of Sciences* sobre el síndrome post-poliomielítico: avances relacionados con la patogénesis y el tratamiento. Esa reunión marcó la aceptación del síndrome post-polio como entidad clínica genuina.

No existe un registro, al menos en Estados Unidos, de las personas a las que se diagnosticó la enfermedad. Las mejores estimaciones se basan en la información del Centro Nacional de Estadística sobre la Salud. Sobre la base de datos de una encuesta que realizó en 1987, había entonces más de 640.000 que habían sobrevivido a la poliomielitis, número superior al de personas con esclerosis múltiple, esclerosis lateral amiotrófica o lesiones de médula espinal.

Desde 1987, pese a las bajas por defunción, esa cifra se ha visto aumentada con los inmigrantes. Se desconoce cuántos padecen el síndrome post-polio. De acuerdo con algunos trabajos podrían llegar hasta un 40 por ciento de los que han sobrevivido a la polio. Ello supone que en Estados Unidos el número de personas afectadas por el síndrome post-polio podría rondar los 250.000.

El conocimiento del mecanismo de infección del virus de la poliomielitis puede servir de ayuda para desentrañar las causas posibles del síndrome post-polio. Hablamos de un virus de ARN que penetra en el organismo a través del agua o alimentos contaminados; también, si las manos que lo portan entran en contacto con la boca. En su mayoría, las personas infectadas no presentan síntomas, o experimentan una enfermedad autorrestringida que se caracteriza por fiebre y alteraciones gastrointestinales durante varios días. El virus de la poliomielitis, que se replica en el tejido linfoide de la garganta y el intestino delgado, puede recorrer este último sin causar daño alguno, o pasar a la sangre y propagarse por el organismo entero. Sólo en una pequeña minoría de las personas infectadas —entre el uno y el dos por ciento— el virus invade el sistema nervioso central y produce parálisis de alcance impredecible.

Peculiaridad distintiva de la infección aguda de polio es la predilección del virus por las neuronas que controlan los músculos. Las neuronas motoras están constituidas por un soma celular que se aloja en el asta anterior de la médula y un eje alargado que se extiende hasta los músculos. Cerca del extremo de cada axón emergen ramificaciones o brotes que se dirigen hacia las diferentes células musculares. En la interfaz neuromuscular, o sinapsis, las terminaciones del axón liberan acetilcolina, un neurotransmisor que provoca la contracción de las fibras musculares. Llámase unidad motora al conjunto de una neurona motora y el grupo de células musculares que activa.



2. LA ACTIVIDAD NORMAL de la acetilcolina inicia el proceso de la contracción muscular. Cuando la acetilcolina se libera de un axón en la hendidura sináptica, se une a receptores de la célula muscular, provocando su contracción. Una enzima hidroliza la acetilcolina restante en la hendidura sináptica y la convierte en colina y acetato, que el axón reabsorbe y resintetiza nueva acetilcolina. La interrupción de este ciclo puede conducir a una debilidad progresiva del músculo.

Con una precisión escalofriante, el virus de la polio invade las neuronas motoras sin menoscabar las neuronas adyacentes, que controlan las funciones de la sensibilidad, intestinos, vejiga y aparato genital. Hasta hace muy poco, en que se identificó la presencia de receptores en la interfaz neuromuscular, se desconocía la razón de semejante conducta. Estos receptores permiten la entrada del virus en un axón y su desplazamiento posterior hasta el soma neuronal en el asta anterior de la médula. El virus de la polio infecta más del 95 por ciento de las neuronas motoras de la médula y muchas otras células del cerebro. Las células infectadas sucumben al virus, pero otras consiguen sobrevivir.

No puede predecirse el alcance de la parálisis. Las neuronas motoras que sobreviven desarrollan nuevas prolongaciones en respuesta a un estímulo desconocido. Estos brotes nuevos reinervan las fibras musculares que habían quedado desamparadas por la muerte de las neuronas motoras precedentes. En cierto sentido, el crecimiento de los brotes axonales adicionales representa el esfuerzo del organismo por mantener vivas y activas el mayor número posible de las células musculares que quedaron huérfanas. Una neurona motora que en un comienzo estimulaba 1000 células musculares puede acabar inervando entre 5000 y 10.000 células, creando una unidad motora gigante. Estas unidades motoras enormemente ampliadas posibilitan que con unas pocas neuronas motoras se realice el trabajo de muchas.

Otra estrategia adaptativa que redobla la fuerza tiene que ver con el incremento del tamaño de las células musculares cuando éstas se someten a ejercicios regulares. Ambas adapataciones compensatorias —aumento de tamaño y aparición de nuevos brotes de axones— son tan eficaces, que se puede perder hasta un 50 por ciento del número original de neuronas motoras sin que se aprecie una merma clínica de la fuerza mus-

LAURO S. HALSTEAD, director de los programas de lesiones medulares y del síndrome post-polio en el Hospital Nacional de Rehabilitación en Washington, enseña clínica en la facultad de medicina de la Universidad de Georgetown.

cular normal. Pero las adaptaciones no son ni estáticas ni permanentes. Todo lo contrario. Después de una recuperación de la fase aguda de poliomielitis, se asiste a un proceso de remodelación de las unidades motoras con degeneración (pérdida de viejas prolongaciones) y reinervación contemporánea (aparición de nuevas terminaciones). Merced a ese proceso de remodelación o constante reparación, las unidades motoras mantienen un estado de equilibrio de la fuerza muscular. Cuando se altera esa situación de equilibrio, reaparece la debilidad muscular.

Existe entre los investigadores el convencimiento creciente de que el síndrome post-polio implica una degeneración lenta de los brotes de los axones terminales que inervan las células musculares. David O. Wiechers y Susan L. Hubbell propusieron ese modelo, a comienzos de los años ochenta, tras observar que las pruebas diagnósticas indicaban que el funcionamiento de las neuronas motoras empeoraba progresivamente con el paso de los años en las personas que habían sobrevivido a la poliomielitis. Más recientemente, Daria A. Trojan y Neil R. Cashman, después de examinar los resultados de biopsias musculares y estudios electromiográficos (EMG), propusieron la existencia de dos tipos de desintegración de las neuronas motoras: una lesión progresiva y otra fluctuante.

En su opinión, la lesión progresiva ocurre cuando se suspende la regeneración normal de las prolongaciones del axón proyectadas hacia los músculos. La interrupción del proceso de reparación produce una debilidad muscular progresiva e irreversible. Según parece, la lesión fluctuante resulta de una síntesis o liberación defectuosa del neurotransmisor acetilcolina. Cashman, Trojan y otros han demostrado que el estado de debilidad muscular y de cansancio mejora en algunos pacientes con síndrome post-polio mediante la administración de piridostigmina, fármaco que potencia la eficacia de la acetilcolina en el desencadenamiento de la contracción muscular. Otros investigadores ahondan en los factores de crecimiento de los nervios, agentes que estimulan el crecimiento de neuronas y células musculares.

Aunque la degeneración de los brotes axónicos puede explicar la aparición de una nueva debilidad muscular y del cansancio, sigue envuelta en el misterio la causa principal de la degeneración. La hipótesis más plausible propone que la debilidad muscular obedece a una utilización excesiva de las neuronas motoras a lo largo del tiempo. Esa explicación da por supuesto que, después de la recuperación de la poliomielitis, las neuronas motoras gigantes han de trabajar más que las neuronas normales para poder mantener las actividades diarias. Al cabo de años de continuado funcionamiento, estas neuronas motoras agigantadas acaban sufriendo un tipo de agotamiento metabólico que conduce a una incapacidad para regenerar nuevos botones axónicos que reemplacen a los que entran en degeneración. No hay un modo directo de medir la fatiga metabólica de las neuronas motoras, pero los datos que apoyan esta hipótesis pueden inferirse de las anomalías dejadas al descubierto por biopsias musculares, pruebas de electrodiagnóstico y respuesta clínica al ejercicio.

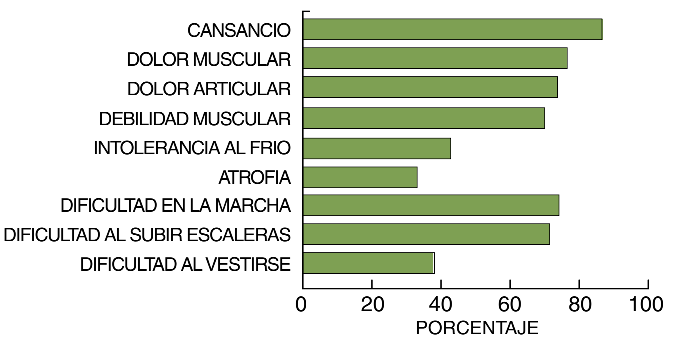
Para ciertos investigadores, algunas neuronas motoras del asta anterior de la médula en supervivientes de poliomielitis parecen ser menores que lo normal. Se piensa que estas neuronas motoras menores sufrían ya alguna alteración en el momento de la infección de poliomielitis y que eran vulnerables a un fallo prematuro. La desaparición significativa de neuronas motoras no suele ocurrir antes de los 60 años. Puesto que los pacientes que sobreviven a la polio tienen un número bastante reducido de neuronas motoras, bastaría la pérdida de unas cuantas unidades motoras operativas para provocar una merma desproporcionada de función muscular.

Con todo, el agotamiento de las neuronas motoras derivado de la edad quizá no constituya un factor determinante en el síndrome post-polio. No se ha podido demostrar una correlación positiva entre el comienzo de una nueva pérdida de fuerza muscular y la edad cronológica. Por contra, la longitud del intervalo entre el comienzo de la poliomielitis y el inicio de los nuevos síntomas sí parece una variable determinante.

La persistencia del virus de la polio en el organismo —o, con mayor precisión, de partículas víricas que han permanecido latentes durante muchos años y que se reactivan por algún mecanismo desconocido— puede tener también algo que ver. De la investigación en varios centros se desprende la existencia de fragmentos de ARN semejantes a los del virus de la polio en el líquido cefalorraquídeo y en el tejido de la médula espinal de pacientes con síndrome post-polio, pero no en quienes, habiendo sobrevivido a la polio, no presentan dicho síndrome. Pero fragmentos de ARN, sin embargo, no parecen tener un potencial infectivo. Se desconoce, sin embargo, si estos hallazgo son incidentales o indican un posible papel vírico.

Entre otras causas posibles que se han aducido del síndrome post-polio, citemos la respuesta mediada por el sistema inmunitario, deficiencias hormonales y toxinas ambientales. Algunas de las hipótesis parecen plausibles, pero no existen datos suficientes que garanticen un apoyo decidido.

Carecemos de pruebas definitivas para el diagnóstico del síndrome post-polio. Los análisis de sangre, biopsias musculares y registros de EMG de la actividad muscular muestran, a menudo, las



3. LOS SINTOMAS NUEVOS que con mayor frecuencia refieren los pacientes con síndrome post-polio son cansancio, dolor muscular, dolor articular y debilidad general. Entre los problemas funcionales recordaremos las dificultades en la marcha y al subir escaleras.

4. PULMONES DE ACERO y camas especiales se reunían en salas especiales para facilitar la vigilancia de enfermeras y médicos en los centros de rehabilitación, como éste de Rancho Los Amigos en California. La idea de juntar a los pacientes que requieren un cuidado especial es uno de los legados de la poliomielitis, legado que puede verse reflejado en las unidades de cuidados intensivos de nuestros modernos hospitales.



mismas alteraciones en los afectados de síndrome post-polio y en quienes no lo padecen. En consecuencia, el diagnóstico debe asentarse en la eliminación sistemática de otras causas que justifiquen la sintomatología del paciente.

El Grupo de Trabajo sobre el Síndrome Post-Polio, constituido por investigadores, clínicos y supervivientes de la poliomielitis, ha preparado un canon normativo para el diagnóstico del síndrome. En la pérdida de fuerza muscular después de muchos años de funcionamiento estable, tenemos quizá el síntoma más característico. Muchos de los síntomas del síndrome post-polio son tan generales, que en ocasiones resulta poco práctico ir descartando posibles causas. Así, una nueva pérdida de fuerza puede resultar de una falta de ejercicio muscular. La merma de fuerza que provoca la falta de uso puede asemejarse a la del síndrome post-polio y complicarlo. Prescindiendo de la causa subyacente, una vez que la pérdida de fuerza muscular ha comenzado puede desencadenarse una cascada de otras molestias, lo que dificulta la identificación del síntoma original.

Al igual que con otras dolencias crónicas, se busca aliviar los síntomas, facilitar la función muscular y potenciar el sentido de bienestar del paciente. Apoyo y ritmo pueden ser las palabras que definen este enfoque terapéutico. Las medidas eficaces van desde la sencillez de la prescripción de un bastón o una silla de ruedas hasta la complejidad de introducir al paciente en un pulmón de acero u otra forma de respiración asistida. Por razones físicas y psicológicas, se anima a los pacientes a permanecer activos. El nuevo estilo de vida, sin embargo, debe incorporar interrupciones para el descanso. Para la gran mayoría de los pacientes es deseable mantener un programa de ejercicios. Para algunos, algo tan sencillo como estiramientos suaves o varios tipos de yoga. Para otros, puede ser algo más vigoroso con la inclusión en ocasiones de ejercicios aeróbicos intensos.

Con ciertos tipos de ejercicio controlados, algunos han conseguido recuperar y mantener la fuerza muscular. Aunque no hay ningún remedio mágico, la medicación ayuda: dosis bajas de antidepresivos tricíclicos pueden aliviar en ocasiones los dolores musculares en ciertos pacientes; la piridostigmina puede amortiguar el cansancio y mejorar el tono muscular.

Por regla general, la progresión de los síntomas es bastante lenta y el pronóstico general bueno, a menos que se presenten complicaciones en la respiración o en la deglución. Sin embargo, cuando las reservas de fuerza y aguante están en baja, cualquier leve alteración en la estabilidad de las neuronas motoras puede resultar en una pérdida desmesurada de la función muscular, que a menudo es psicológicamente devastadora.

Quienes han sobrevivido a la polio saben de luchas y sacrificios. También de triunfos: el comienzo, repentino y aleatorio, de la parálisis; la restauración de la fuerza, al parecer, como resultado de la fuerza de voluntad individual, y, por último, la vuelta a una vida activa y productiva que les lleva al convencimiento de que la polio quedó atrás.

En la mayoría de los casos la historia se hace posible negando la incapacidad y la realidad de lo que se ha perdido y de la vida que podría haberse vivido. Ejemplo famoso de no aceptación de incapacidad nos lo ofreció Franklin D. Roosevelt, que ocupó la presidencia de los Estados Unidos. Aunque recuperó pronto el uso normal de los brazos tras haber contraído la poliomielitis, pasó años de esfuerzo heroico, sin apenas éxito en aprender a andar. Llegado a la presidencia, continuó en su tesón por disimular el grado de su discapacidad. En el ocaso de su vida, Roosevelt experimentó una pérdida creciente de fuerza muscular, al parecer compatible con un síndrome post-polio.

Hasta no hace mucho, la mayoría de nosotros tendía a evitar el encuentro con otros supervivientes o formar grupos de ayuda mutua. Eramos conscientes de nuestra limitación física, pero nos sentíamos más incómodos que incapaces. Con el reentrenamiento de los músculos que nos quedaban, nos creíamos con vigor suficiente para casi todo, sin excluir la presidencia de los Estados Unidos, a imagen de nuestro ilustre predecesor.

Cuando torna la pérdida de fuerza de la mano del síndrome post-polio, la actitud de rechazo permanece intacta, lo que hace aún más difícil aceptar los nuevos cambios. En cuanto se reconoce como inevitable la discapacidad, puede hundirse uno en la ira, amargura y desesperación. Para salir al paso se han creado grupos de apoyo a estos pacientes. Ante la nueva situación, muchos retoman el empuje de su antigua fase de recuperación de la poliomielitis. Si el fisioterapeuta prescribía entonces 10

repeticiones de ejercicios dos veces al día para fortalecer un músculo determinado, los pacientes realizaban 20 o más repeticiones tres veces al día. Para muchos, el ejercicio llegaba a convertirse en una obsesión diaria, para otros, casi en una devoción religiosa. Así, quienes sobrevivieron a la poliomielitis desarrollaron una relación especial con su organismo. Experimentaban un nuevo dominio sobre sus músculos y movimientos, un elemento de control que no existía antes de la enfermedad. Era una lección visceral que se adentraba en otros aspectos de sus vidas y que probablemente explica la razón de su éxito en los estudios y en el trabajo.

Los individuos que se han recuperado de una poliomielitis paralítica tienen por término medio una formación más sólida que la población general. Aceptan la responsabilidad del matrimonio y de sacar adelante una familia en la misma medida que las personas que no sufren ningún tipo de discapacidad. También su tasa de empleo es unas cuatro veces más alta que la de otras personas con otro tipo de discapacidades.

En buena medida, los promotores de las organizaciones de apoyo a discapacitados proceden del campo de la poliomielitis. Sus esfuerzos han conducido a la fundación de movimientos y logrado cambios legislativos. La gente ignora que muchos de estos líderes se encuentran entre los más discapacitados: gente que camina con férulas y muletas, que se desplazan en sillas motorizadas o llevan aparatos portátiles para la respiración.

La poliomielitis ha ejercido un efecto profundo sobre la medicina. Tras años de esfuerzos, el desarrollo de la vacuna supuso un notable avance. Arrastró a muchos estadounidenses a participar activamente, primero en campañas para recabar fondos y después en el ofrecimiento voluntario para que sus hijos participaran en las pruebas de la vacuna Salk en 1954. Del impulso dado a la investigación sobre la poliomielitis se beneficiaron otros hallazgos que desde entonces han revolucionado los campos de la virología e inmunología.

La epidemia de poliomielitis aceleró el desarrollo de la medicina de rehabilitación. A diferencia del enfoque tradicional, centrado en la curación y recuperación de órganos afectados por la enfermedad, la medicina de rehabilitación pone el acento en la reconstrucción de las funciones del organismo y en el aprendizaje de habilidades necesarias para una vida independiente. Los principios desarrollados para el tratamiento de los pacientes poliomielíticos hace decenios se aprovechan ahora para rehabilitar personas con lesiones medulares o cerebrales, accidentes cerebrovasculares o enfermedades degenerativas.



5. FRANKLIN D. ROOSEVELT, tras haber contraído la poliomielitis que le dejó paralítico en 1921, estaba convencido de que los ejercicios de natación en las fuentes termales de Warm Springs eran un medio excelente para el refortalecimiento de los músculos. Hizo todo lo que pudo para ocultar su discapacidad.

La unidad de cuidados intensivos, imprescindible en cualquier hospital moderno, es otro de los legados de la era de la epidemia de polio. Cuando el grupo creciente de afectados, que requerían respiración asistida, empezaron a invadir los centros de rehabilitación, se juntaron los pulmones de acero en salas especiales al objeto de que pudieran vigilarse por enfermeras especializadas. Surgieron, además, centros regionales de respiración asistida para tratar a los enfermos más graves. Algunos de estos centros prestan hoy ayuda a personas con lesiones medulares.

El dinero con que se crearon esos centros de respiración asistida en los Estados Unidos provino en un comienzo de la Fundación Nacional para la Parálisis Infantil, que posteriormente dio lugar a las campañas populares conocidas por "March of Dimes": envío por correo de monedas de diez centavos para apoyar la lucha contra la polio. Durante un tiempo, esa batalla sacó a la luz las mejores cualidades del pueblo: vecinos que llevaban alimentos a las familias que permanecían en cuarentena encerradas en sus casas, clubes juveniles que organizaban colectas para ayudar a sus compañeros hospitalizados, y asociaciones de mujeres que adoptaban, para su cuidado durante el año, salas de hospitales locales dedicadas a pacientes poliomielíticos.

Con la vacuna desapareció la polio y cuanto significó su guerra. Lo que en tiempos fue ejemplo de fortaleza humana, parecía desembocar luego en actitudes negligentes ante millares de supervivientes de la enfermedad que seguían necesitando ayuda médica y económica. Como ocurre con cualquier guerra, los excombatientes siguen descubriendo que a la gente no le gusta que se le recuerden los heridos y los muertos.

Ni siquiera el milagro de las vacunas está exento de problemas. La mayoría de los científicos está de acuerdo en que la vacuna oral de Sabin es superior a la vacuna inyectable de Salk; sin embargo, la oral entraña riesgos. En efecto, causa la misma enfermedad que pretende prevenir, entre diez y quince casos cada año, bien por haberse producido una mutación en el virus, bien por presentar el receptor una deficiencia inmunitaria que permita que el virus atenuado se adueñe del organismo y produzca la parálisis. El gobierno federal de los Estados Unidos recomienda ahora dos inmunizaciones iniciales con la vacuna inyectable con virus muertos seguida algún tiempo después de dos dosis de vacuna oral con virus vivos. En teoría, esta combinación proporciona las ventajas de ambos tipos de vacuna y nos hace concebir la esperanza de que la polio quede para siempre en los libros de historia.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

IN THE SHADOW OF POLIO: A PERSONAL AND SOCIAL HISTORY. Kathryn Black. Addison-Wesley, 1996.

POST-POLIO SYNDROME: A NEW CHALLENGE FOR THE SURVIVORS OF POLIO. CD-ROM publicado por Bioscience Communications, Nueva York, 1997.

MANAGING POST-POLIO: A GUIDE TO LIVING WELL WITH POST-POLIO SYNDROME. Dirigido por Lauro S. Halstead. NRH Press y ABI Professional Publications, Falls Church, Va., 1998.

Las primeras observaciones

La repetición de los experimentos que realizaron los primeros microscopistas muestra lo que ellos percibieron con sus rudimentarios instrumentos constituidos por una sola lente

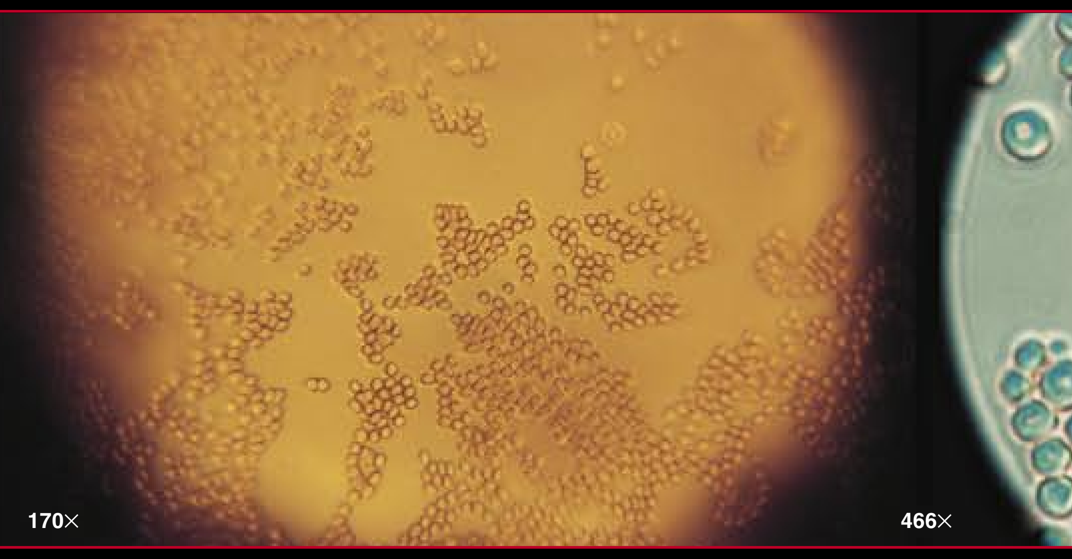
Brian J. Ford

En 1674 Antony van Leeuwenhoek descubría, mientras miraba a través del microscopio que había construido, un mundo nuevo, fascinante. Nuestro holandés aficionado a la ciencia se sorprendió cuando, observando la baba que había recogido de la superficie de un lago, halló organismos desconocidos: "Quedé maravillado ante el número de animálculos que se movían raudos por el agua, de aquí para allá, arriba y abajo."

Con Leeuwenhoek, que vivió de 1632 a 1723, se inauguró la microbiología. Antes de que floreciera la ciencia de la óptica, Leeuwenhoek talló con sus manos más de 500 microscopios. Con ellos, registró, además de los "animálculos" o microorganismos, muchas estructuras celulares, eritrocitos y espermatozoides. Describió bacterias, protozoos, rotíferos, células vegetales y hongos.

Pese a todo, muchos contemporáneos le despreciaron y tildaron de diletante y fantasioso. Su perspicacia no prendió. Hasta mediados del siglo XIX —la época de Louis Pasteur— no se aceptó la idea de microorganismo. Incluso hoy no faltan quienes niegan que Leeuwenhoek viera lo que afirmaba haber visto con su rudo instrumento de una sola lente. La investigación moderna se ha servido de un microscopio de Leeuwenhoek para aducir que con los aumentos de sus aparatos no podía lograr la finura de detalle a la que arriba en sus notas. Por ejemplo, de los eritrocitos sólo podía ver manchas borrosas.

Los detractores de Leeuwenhoek han esgrimido recriminaciones similares contra Robert Brown. En 1827, el joven cirujano escocés dio testimonio de un fenómeno que hoy lleva su nombre: el movimiento browniano. Observó en el seno celular el movimiento incesante de partículas minúsculas. Unos años después, Brown dio con otro fenómeno inédito mirando por su microscopio monocular. En su viaje a Australia en busca de plantas exóticas se prendó de las orquídeas que herborizaba. Después de examinar una y otra vez diferentes células



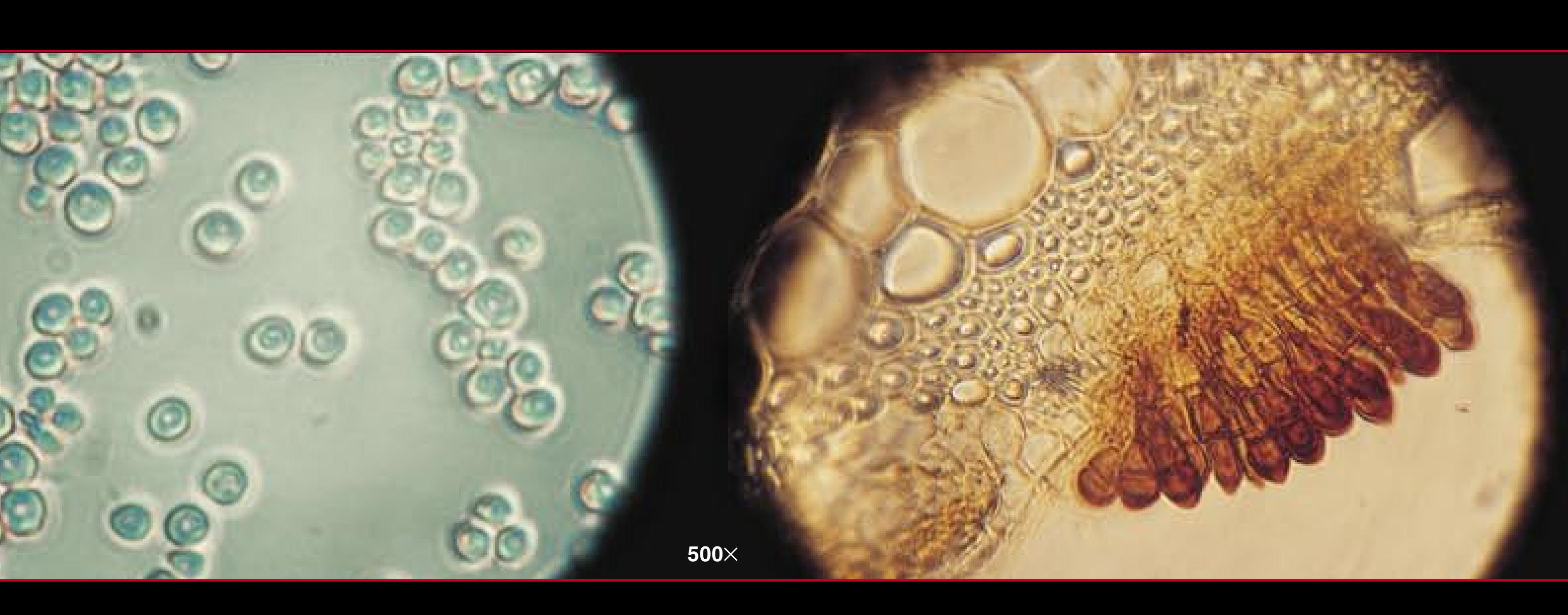
1. CELULAS LUMINOSAS de *Tradescantia virginiana*, traídas a primer plano con un microscopio de Robert Brown, cuando las baña la luz solar (*página siguiente*, *arriba*). Con el microscopio de Antony van Leeuwenhoek, que se conserva en la Universidad de Utrecht, se distingue de forma nítida los hematíes (*izquierda*); incluso el núcleo lobulado de un leucocito podría identificarse con ese aparato elemental. Un microscopio monocular moderno ofrece también imágenes impresionantes: células de levadura (*centro*) y esporas fúngicas (*derecha*).

vegetales, llegó a la conclusión de la existencia de una estructura que se repetía en todas ellas: “En cada célula de la epidermis... aparece una areola circular, más opaca que la membrana.” Brown no tardó en establecer que se trataba de un rasgo común de las células de muchos organismos. Con el tiempo, le impuso el nombre que todavía perdura: “el núcleo celular”.

Igual que ocurrió con Leeuwenhoek, los trabajos de Brown no recibieron el aprecio debido. En manuales contemporáneos se lee que Brown observó sólo el movimiento de granos de polen, pero no el movimiento mucho más sutil del interior celular. En una reciente revisión de la capacidad del microscopio de Brown se concluía que ese instrumento pudo haber sido útil para la disección, pero en ningún caso para resolver estructuras de la parvedad del núcleo.

He empleado los microscopios originales de ambos genios y he construido mis propios monoculares. Con ellos, he recreado los experimentos pioneros de Leeuwenhoek y Brown. No es tarea fácil, si tenemos en cuenta que carecemos de cualquier informe detallado sobre los métodos que siguieron; además, debe realizarse con sumo cuidado el ajuste de los microscopios y acomodarse fielmente a su proceder. Pues bien, frente a lo que muchos objetaban, con un microscopio simple se observan bacterias, núcleos celulares y movimiento browniano. Con el microscopio de Brown, reconocí mitocondrias, que son cientos de veces más pequeñas que el núcleo celular. Leeuwenhoek y Brown no engañaron en sus notas.

Las imágenes que presentamos no se han manipulado. Revelan la excitación y maravilla que provocaron las primeras observaciones. Y ponen de manifiesto cómo el más humilde de nuestros útiles, aquí microscopios simples del XVII y el XIX, puede cambiar nuestra concepción de la realidad para siempre.



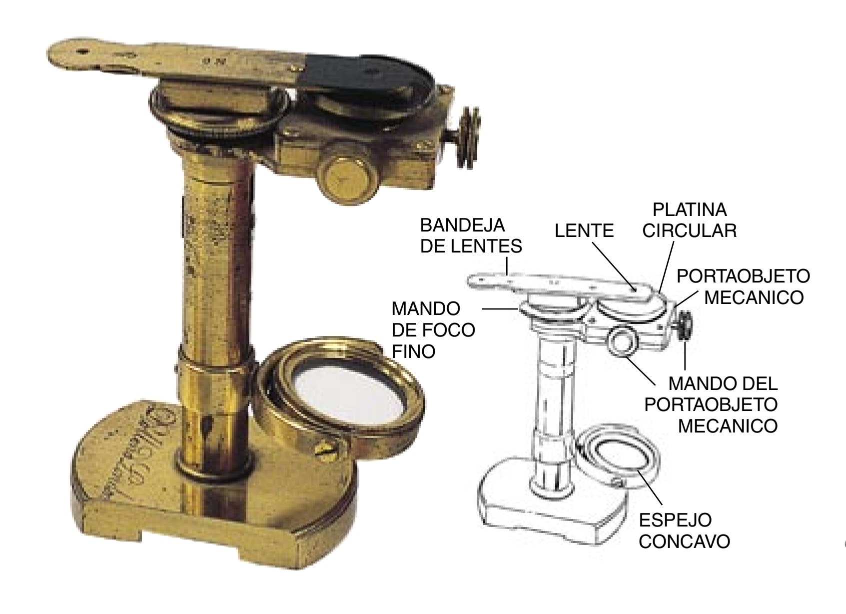
2. **LAS ESPORAS ESPINOSAS de una trufa (*Tuber melanosporum*) sirven para someter a prueba la calidad de resolución del microscopio de Leeuwenhoek. Las minúsculas esporas son del tamaño de una célula, las espinas del tamaño de bacterias. Pese a su simplicidad, el viejo microscopio de 300 años puede captar ambas estructuras con nitidez.**

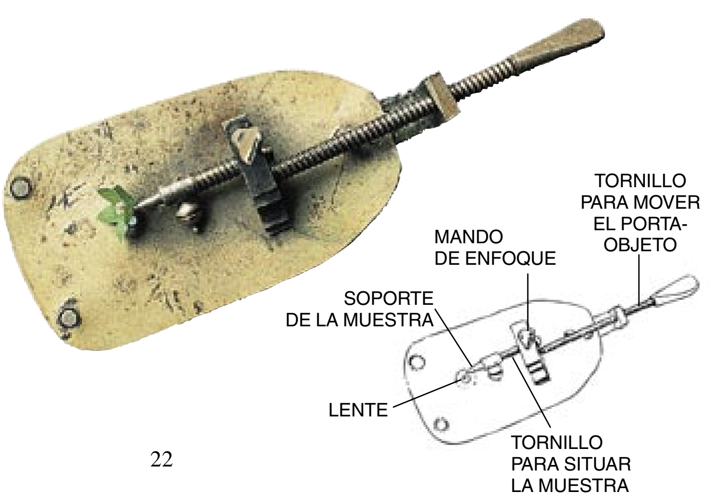
600×

3. **LA BELLEZA DE LA CABEZA DE UN PIOJO puede observarse a través de una lente pulida por Horace Dull de Luton, en el marco de una investigación sobre claridad y poder de resolución de un microscopio del siglo XVII. La antena y los ojos oscuros pardos del insecto, enojosamente familiares para los biólogos de entonces, aparecen con nitidez. Estas lentes mantienen al mínimo la aberración cromática.**

460×

4. **LOS PRIMEROS MICROSCOPIOS SIMPLES del último tercio del XVII eran como el fabricado por Leeuwenhoek (*abajo*), hecho a mano y de latón. Dos tornillos de rosca fijaban y enfocaban la muestra. La lente solitaria de aumento, algo mayor que la cabeza de un alfiler, bastaba para distinguir incluso bacterias. El diseño alcanzó su perfección 150 años después (*derecha*) en los talleres de la firma londinense Dollond, suministradora de instrumentos de laboratorio. Robert Brown poseyó uno de estos hermosos aparatos. Hay un control de foco fino en la parte superior del cuerpo de la columna; dos tornillos operan una platina mecánica. Entre los accesorios está la lente, de 800×. Ambos prototipos miden unos 7,6 centímetros.**





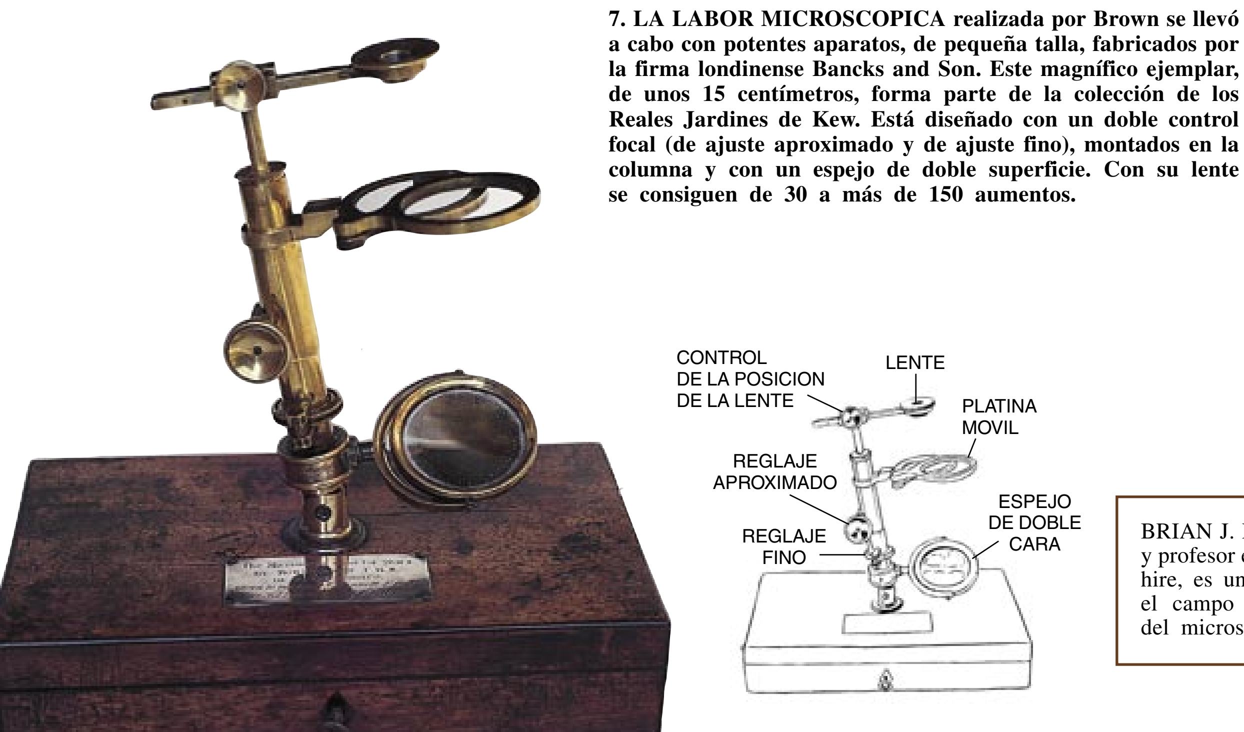
5. PAREDES CELULARES de la raíz del helecho *Osmunda regalis*, según se aprecian con un microscopio monocular de comienzos del siglo XVIII. La claridad de la imagen ofrecida no tiene nada que envidiar a la alcanzada por la mayoría de los microscopios ópticos modernos.

6. HASTA BACTERIAS VIVAS podían captarse con el microscopio simple de Leeuwenhoek. Esta imagen del *Spirillum*, una de las especies descritas por nuestro holandés, pone de manifiesto su destreza investigadora; las bacterias no se ven si no sabemos colocar bien la fuente luminosa y el foco.

220×

1200×

7. LA LABOR MICROSCOPICA realizada por Brown se llevó a cabo con potentes aparatos, de pequeña talla, fabricados por la firma londinense Bancks and Son. Este magnífico ejemplar, de unos 15 centímetros, forma parte de la colección de los Reales Jardines de Kew. Está diseñado con un doble control focal (de ajuste aproximado y de ajuste fino), montados en la columna y con un espejo de doble superficie. Con su lente se consiguen de 30 a más de 150 aumentos.



BRIAN J. FORD, biólogo y profesor en Cambridgeshire, es una autoridad en el campo de la historia del microscopio.

PERFILES

Madhusree Mukerjee

ALAN SOKAL: Contra la impostura del pseudointelectual

“La modestia no es mi fuerte”, admite con una mueca Alan Sokal, profesor de física de la Universidad de Nueva York. “¡Mi parodia es para morirse de risa!” Hace dos años, apareció en la revista *Social Text* un artículo sin pies ni cabeza sobre la “hermenéutica de la gravedad cuántica”, farsa que el propio autor se encargó de poner en evidencia. El “asunto” Sokal (sus detractores prefieren denominarlo maniobra publicitaria) puso de relieve el uso indebido de las ideas científicas por quienes son ajenos a la ciencia. Provocó comentarios en las primeras páginas del *New York Times*, del *International Herald Tribune*, del *London Observer* y de *Le Monde*, y desencadenó debates en las universidades.

Sokal acaba de subir su propio listón al publicar, junto con el físico Jean Bricmont, de la Universidad Católica de Lovaina, un análisis demoledor de lo que llama “el raciocinio chapucero” de posmodernistas, constructivistas sociales, relativistas cognitivos y otros “-istas” semejantes.

El libro, *Imposteures Intellectuelles*, en francés, pone en el punto de mira a autores franceses, aunque también hay ingleses y americanos. Un éxito de ventas que ha indignado a sus oponentes. Es una salva de artillería más en la guerra que libran los científicos y sus críticos.

El suelo del despacho de Sokal está sembrado de artículos, a un lado los de física y a otro los que tratan de su nueva pasión: la defensa de la “concepción científica del mundo”. Las dos mitades se juntan en el centro. Me abro camino entre el caos hacia el gastado sofá del fondo de la sala. Pero Sokal salta a su ordenador para enseñarme su página de Internet, y no tengo más remedio que volver y escuchar sentada a sus pies sobre un libro incómodo.

“El raciocinio chapucero me saca de mis casillas”, declara. “Me enerva la proliferación de lucubración chapucera que confunde las ideas válidas con las necias.” Lo que más le preocupa (aparte de las acostumbradas apropiaciones indebidas del “principio de incertidumbre”, “el teorema de Gödel”, “caos” y otros términos de las ciencias físicas) es el relativismo o el constructivismo social aplicado a la ciencia. “Para decirlo pronto”, explica, recalcando cada palabra, como si estuviera dando una clase, “la idea es que no existen verdades objetivas ni en las ciencias sociales *ni* en las ciencias naturales; eso es lo que más me altera, que se afirme que la validez de cualquier afirmación sea *relativa* al individuo que la ha elaborado o al grupo social o a la cultura a la que pertenece ese individuo.”

Thomas F. Gieryn, sociólogo de la Universidad de Indiana, aduce que el problema con la llamada guerra de las ciencias es que “ninguna de las partes se ve a sí misma como la ve la otra”. En 1994 el matemático Norman J. Levitt y el biólogo Paul R. Gross publicaron *Higher Superstition: The Academic Left and Its Quarrels with Science*, un alegato contra una abigarrada colección de personajes (sociólogos, antropólogos, relativistas, feministas, ecorradicales y otros tales) por su hostilidad a la ciencia. El texto, educado si bien pugnaz en ocasiones (los autores expresaban su esperanza de que “el doloroso bolo del postmodernismo pasará a través de las estreñidas tripas de la vida académica más bien pronto”) consternó a los que allí aparecían, muchos de los cuales replicaron que sus ideas no estaban bien recogidas.

El libro, sin embargo, impulsó a Sokal a visitar la biblioteca y recopilar un ramillete de citas enjundiosas, en torno a las cuales maquinó su engaño. “Me llevó mucho escribirlo y revisarlo una y otra vez hasta que el artículo alcanzó el nivel deseado de falta de claridad”, dice entre risas. Tras poner en evidencia la farsa, recuerda Sokal, recibió muchos mensajes por correo electrónico de “gente [de las humanidades y las ciencias sociales] que me decían: ‘Gracias, gracias, lo hemos estado diciendo durante años, pero nadie nos escuchaba; ha tenido



Alan Sokal ha puesto en el espejo la pseudociencia de muchos textos universitarios

Transgressing the Boundaries:
Towards a Transformative Hermeneutics of Quantum Gravity

Alan D. Sokal
Dept. of Physics
New York University

There are many natural scientists, and especially physicists, who continue to reject the notion that the disciplines concerned with social and cultural criticism can have anything to contribute, except perhaps peripherally, to their research. Still less are they receptive to the idea that the very foundations of their worldview must be revised or rebuilt in the light of such criticism. Rather, they cling to the dogma imposed by the long post-Enlightenment hegemony over the Western intellectual outlook, which can be summarized briefly as follows: that there exists an external world, whose properties are independent of any individual human being and indeed of humanity as a whole; that these properties are encoded in "eternal" physical laws; and that human beings can obtain reliable, albeit imperfect and tentative, knowledge of these laws by hewing to the "objective" procedures and epistemological strictures prescribed by the (so-called) scientific method.

El artículo zumbón de Sokal apareció en el número especial de Social Text *dedicado a "la guerra de las ciencias" en 1996*

que venir alguien de fuera para exclamar que nuestro emperador local está desnudo'".

Dice que en realidad su objetivo no era defender a la ciencia. Entre otras cosas le molestaba que el relativismo emanara, en parte, de la izquierda. "Y yo", protesta, "políticamente, también soy de izquierdas". Cree que los académicos más izquierdistas estaban disipando sus energías en apologías estériles. "Necesitamos elaborar un análisis de la sociedad que sea más convincente para nuestros conciudadanos que lo que puedan leer en las páginas de *Newsweek* y *New York Times*. Y para ello necesitamos muy buenos argumentos. No podemos caer en el discurso chapucero."

Sin embargo, y a pesar de sus motivaciones políticas, los detractores de Sokal consideran que él es parte en la guerra de las ciencias, y militante agresivo. Al disponerme a redactar este perfil, me avisaron en repetidas ocasiones que quien se acerca a ese fuego acaba chamuscado. La responsable de la sección bibliográfica de *Science*, me contaron, perdió el cargo por una reseña negativa que se había publicado sobre *The Flight from Science and Reason*, una compilación de ensayos dirigida por Gross, Levitt y Martin W. Lewis. El autor de la reseña había caído en el ataque personal, pero el *Chronicle of Higher Education* imputaba a Levitt haber organizado una campaña.

Levitt dice que, aunque él envió una carta criticando la calidad de las reseñas bibliográficas, acompañada por un escrito firmado por algunos más, "hubo muchas otras cartas [a *Science*] con las que no tuve nada que ver". Monica M. Bradford, la redactora jefa de *Science*, aduce que la reorganización del departamento tuvo mucho más que ver con la decisión de dimitir de la responsable de la sección.

Otra de las "bajas" traída a colación es la plaza de sociología de la ciencia que ofreció a concurso el Instituto de Estudios Avanzados de Princeton y quedó desierta. "Todo por culpa de la guerra de las ciencias", asegura Clifford Geertz, que dirige la facultad de sociología. En dos ocasiones el candidato escogido no pudo ser nombrado porque los investigadores, tanto los de dentro como los de fuera, organizaron una campaña. "Al final, llegamos a la conclusión de que nos faltaba control sobre los nombramientos", afirma Geertz, y la institución devolvió los 500.000 dólares de dotación a la Fundación Henry Luce.

Aunque el candidato inicial, que era Bruno Latour, de la Escuela de Minas de París, ha hecho afirmaciones poco lisonjeras sobre la práctica de la ciencia —que a Sokal le encanta citar— el último, M. Norton Wise, de la Universidad de Princeton, es doctor en física y en historia, y se considera mediador en la guerra de las ciencias. Pero tuvo una disputa con Steven Weinberg, de la Universidad de Texas en Austin, sobre el asunto Sokal, un factor que según Geertz puso a Wise en el disparadero. "Lo que encuentro más reprobable [de la guerra de las ciencias] —se lamenta Geertz— es el grado de politización en que se ha caído."

En favor de Sokal hay que decir que no se ha visto implicado en ninguno de esos episodios. "No me parece que esto sea una guerra", protesta. "Para mí se trata de una discusión intelectual." Pero su implacable burla desgarra los escasos y frágiles vínculos entre científicos y humanistas.

Hugh Gusterson, antropólogo del Instituto de Tecnología de Massachusetts, acusa a Levitt, Gross y Sokal de confundir las críticas constructivas a la ciencia con la enemistad. "Lo que tratan de presentar como pensamiento anticientífico", añade, "es con frecuencia una reflexión sobre las sutilezas y la complejidad del método científico." Gieryn cree que los estudios sobre la ciencia y la tecnología son la cabeza de turco: "Se nos acusa del fracaso de los científicos, incapaces de presentarse airosamente en el foro público." Los científicos replican que los humanistas están celosos de la especial posición social de que gozan los científicos como guardianes del conocimiento objetivo; esa "envidia de la física" les lleva a atacar la objetividad en sí misma.

Hojeando la bibliografía sobre los estudios sobre la ciencia, me encuentro desbordada. La mayor parte del tiempo no llego a comprender de qué se habla, y no digamos a quién se está criticando. Pero en *The Golem: What Everybody Should Know about Science*, de los sociólogos Harry M. Collins, de la Universidad de Southampton, y Trevor J. Pinch, de la Universidad de Cornell, me topo con un ensayo sobre la fusión fría. Los autores sugieren, sin llegar a decirlo, que la fusión fría fue finiquitada porque quienes la proponían carecían del respaldo político frente a los poderosos físicos nucleares y sus intereses creados en los presupuestos de la fusión caliente.

Da la casualidad de que yo trabajaba como física nuclear en la época en que saltó la noticia de la fusión fría. En ese momento, algo dentro de mí se levantó para proclamar que a la mayoría de nosotros nos hubiese encantado que hubiera funcionado. La hostilidad que rezuma ese texto me subleva, dándome una idea de por qué la pasión campa en ambos bandos de la guerra de las ciencias.

"La conclusión que yo sacaría", afirma Gusterson, "es que hay que insultarse menos y debatir más los pormenores sin caricaturizar a la otra parte." Desde las páginas de *Physics Today*, N. David Mermin, de Cornell, ha discutido con Collins y Pinch así precisamente, en un debate tranquilo y civilizado. Y en julio de 1997 se reunieron estos y otros expertos en una modesta "conferencia de paz" en la Universidad de Southampton.

La farsa tuvo al menos un efecto positivo. Sokal salía con una arqueóloga italiana y le pasó una copia de su escrito, aún sin publicar. Mientras volvían a casa, ella se lo leyó con creciente perplejidad, hasta que se dio cuenta de que no era más que un embuste. "Ella fue una de las dos únicas personas ajenas a la ciencia que se dieron cuenta de que era una broma", cuenta orgulloso. "Pero por supuesto que no es la única razón por la que me casé con ella."

Contaminación del agua

Métodos de análisis

La presión social en pro de un entorno más limpio ha favorecido el desarrollo de técnicas instrumentales de análisis de contaminantes. Se ha avanzado, sobre todo, en los métodos de análisis de contaminantes acuosos, desde las mismas etapas previas de recolección y extracción de la muestra.

Empecemos por el muestreo y conservación. Para el muestreo de compuestos inorgánicos deben emplearse envases de plástico (polietileno), para evitar posibles reacciones de intercambio iónico con las paredes de los recipientes de vidrio. Si se trata de analizar cationes metálicos hay que acidificar la muestra con HNO_3 hasta un *p*H inferior a 2, para evitar su posible precipitación y la adsorción de los mismos sobre las paredes del recipiente. En el análisis de compuestos orgánicos se usan envases de vidrio, pues ciertos compuestos orgánicos volátiles se difunden a través de los recipientes de plástico. Las muestras se conservan a 4 ºC para evitar el crecimiento de microorganismos.

De muchos contaminantes orgánicos sólo hay trazas, por lo que suele hablarse de microcontaminantes orgánicos. El análisis de los mismos requiere una etapa de extracción y enriquecimiento de la muestra. A la tradicional extracción líquido-líquido con disolventes orgánicos se ha impuesto últimamente la extracción en fase sólida, mediante cartuchos o discos, que contienen compuestos con cadenas hidrocarbonadas (C_8, C_{18}), polímeros del tipo poliestireno-divinilbenceno, resinas XAD y otros polímeros. La extracción en fase sólida ofrece notables ventajas: mayores porcentajes de recuperación y reproducibilidad, menor consumo de disolventes orgánicos y posibilidad de usar fases especiales.

Desde hace poco se recurre a la extracción con fluidos supercríticos, por lo común dióxido de carbono, de amplio uso en muestras sólidas (sedimentos, partículas de escape de automóvil o polvo atmosférico). Si la muestra a analizar es líquida, la extracción con fluidos supercríticos se emplea en combinación con la extracción en fase sólida; tal acontece en el caso de pesticidas, policlobifenilos (PCB) o hidrocarburos policíclicos aromáticos (PAH).

Cuando interesa medir la concentración de compuestos orgánicos volátiles, se obtiene una mayor sensibilidad en el análisis con la extracción mediante el sistema de espacio de cabeza o mediante el sistema de purga y atrapamiento. Este último permite analizar concentraciones de compuestos orgánicos volátiles de sólo unos nanogramos por litro.



Espectrofotómetro de absorción atómica (análisis de cationes metálicos), y a su derecha, un analizador de carbono orgánico total (análisis de la concentración de materia orgánica)

A veces será necesario purificar la muestra para eliminar sustancias que obstruyan el análisis. En tal situación, los métodos habituales son la extracción líquido-líquido, la extracción en fase sólida, la cromatografía de adsorción en columna y la cromatografía de permeabilidad en gel (o cromatografía de exclusión molecular).

Realizadas la extracción y purificación de la muestra, el químico ambiental procederá al análisis propiamente dicho. Muy distintos son los métodos según se trate del análisis de compuestos inorgánicos u orgánicos.

El análisis de los compuestos inorgánicos abarca tanto aniones como cationes. Los métodos tradicionales de análisis de aniones inorgánicos son las volumetrías, gravimetrías y turbidimetrías, espectrofotometría de absorción o colorimetría y electrodos selectivos. Las volumetrías permiten determinar la acidez o basicidad de la solución (iones CO_3^{2-}, HCO_3^-), las gravimetrías y turbidimetrías determinan la concentración de sulfatos, las colorimetrías permiten el análisis de los iones fluoruro, cloruro, bromuro, nitrito, fosfato y nitrato (este último también mediante medida directa en el ultravioleta). Por fin, mediante electrodos selectivos se determinan los iones fluoruro, cianuro y yoduro. Tales técnicas, sin embargo, adolecen de una desventaja: la de tener que analizar por separado cada uno de los aniones.

Por eso, se opta por el método de cromatografía líquida de alta eficacia, que emplea resinas de intercambio iónico y generalmente detección conductimétrica. Los eluyentes suelen ser: mezclas HCO_3^-/CO_3^{2-}, OH^-, ácido ftálico y otros. Esta técnica permite una rápida y simultánea cuantificación de los aniones presentes en el agua. También se está abriendo paso la electroforesis capilar, en la que se aplica una diferencia de potencial entre los extremos de un capilar de separación.

El método más frecuente de análisis de cationes inorgánicos es la espectroscopía de absorción atómica,

si bien los metales alcalinos (litio, sodio, potasio y cesio) se miden por emisión atómica. El método más usual de atomización es mediante una llama, normalmente de aire-acetileno, aunque para elementos refractarios se suele usar la de óxido nitroso-acetileno. Otras fuentes de atomización son: la cámara de grafito y el ICP-Emisión Atómica (mediante plasma de argón), que proporcionan una mayor sensibilidad y permiten el análisis de ultratrazas. Para el caso de elementos que forman hidruros volátiles (arsénico, selenio, teluro, antimonio, bismuto y otros) se usa el método de generación de hidruros.

También se puede emplear para el análisis de metales la técnica de cromatografía líquida de alta eficacia (resinas de intercambio iónico), que puede determinar simultáneamente varios metales, así como distinguir y separar un mismo metal en distintos estados de oxidación. Entre las técnicas de análisis de compuestos orgánicos ocupa un lugar destacado la cromatografía de gases. Cuando se usa en conjunto con un detector de espectrometría de masas (GC-MS) constituye una herramienta muy potente a la hora de identificar compuestos orgánicos en una muestra acuosa. Para el caso de compuestos organohalogenados (pesticidas organoclorados, PCB y dioxinas) se suele emplear el detector de captura electrónica (ECD) y para compuestos organometálicos el detector de emisión atómica (AED).

Para el análisis de fenoles, hidrocarburos policíclicos aromáticos y pesticidas organoclorados y organofosforados, se recurre también a la cromatografía líquida de alta eficacia, acompañada de un detector idóneo.

Para el análisis de la carga orgánica total del agua es especialmente útil la medida del carbono orgánico total (COT), utilizando equipos automatizados que permiten evaluar diversos parámetros: carbono orgánico total, carbono inorgánico y carbono orgánico no purgable. La medida del carbono orgánico total se está imponiendo, por su mayor reproducibilidad y rapidez en el análisis (en torno a los cinco minutos).

Por último, cada vez es más frecuente el uso de inmunoensayos enzimáticos, altamente sensibles y específicos, aplicados principalmente al análisis de pesticidas, PCB y PAH.

JAVIER RODRÍGUEZ VIDAL
Departamento de Química
Escuela Universitaria Politécnica
de Burgos

El beri-beri

¿Enfermedad emergente?

El beri-beri constituye una enfermedad carencial endémica del sudeste asiático, donde el arroz es el ingrediente básico de la dieta. La roñería de un superintendente, que suprimió a los animales el arroz descascarillado, más caro, y la atenta observación de un patólogo holandés, de nombre Christiann Eijkmann permitieron a éste, en 1906, relacionar la enfermedad con la cáscara de arroz. Pasados algunos años, Funk aislaba la vitamina de la cascarilla, la tiamina o vitamina B_1.

Las vitaminas, "aminas necesarias para la vida", no pueden ser sintetizadas por el organismo, que las extrae de los alimentos y enferma si no las obtiene. La tiamina, necesaria para metabolizar los hidratos de carbono, se encuentra en casi todos los alimentos. El calor húmedo la degrada fácilmente.

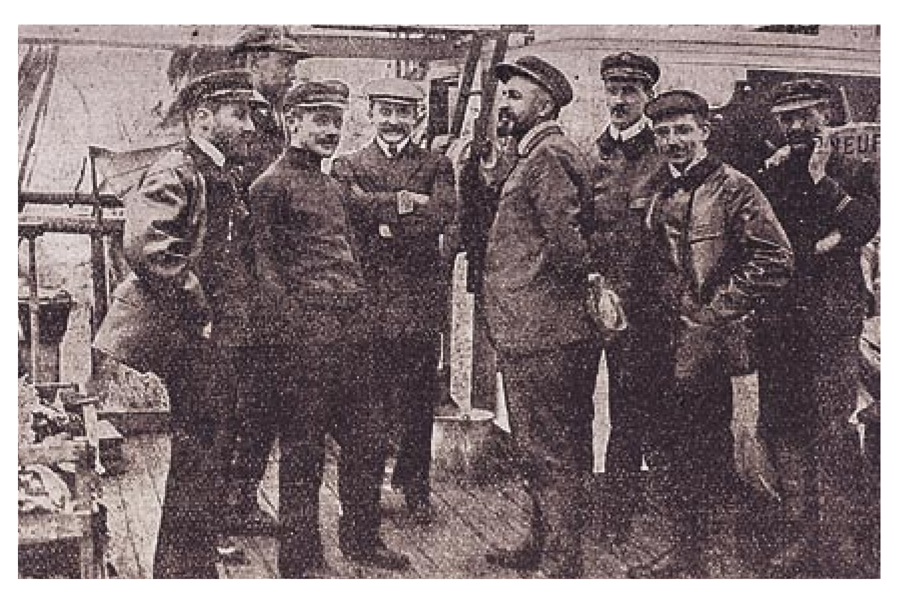
El organismo sólo puede almacenar tiamina en cuantía suficiente para pocos días. Su carencia origina los diferentes tipos de beri-beri. El "húmedo" se asocia a una grave lesión cardiaca con edemas de las extremidades; la forma "seca" provoca parálisis y falta de sensibilidad más o menos dolorosa en las piernas. La ingestión de una dieta rica en calorías y los esfuerzos musculares predisponen a la forma "húmeda". Una tercera forma de beri-beri, el Wernicke-Korsakow, ha cobrado especial importancia por su frecuente desarrollo asociado a dietas pobres en proteínas con abundantes hidratos de carbono y alcoholismo crónico, azote de los estratos bajos en las grandes ciudades.

En Europa el beri-beri nunca fue un problema de salud pública. El principal cereal de su dieta, el trigo, no se tomaba solo ni descascarillado. Por eso no pensó en él Jean-Baptiste Charcot, que lo sufrió, y la segunda vez muy grave, en sus dos expediciones a la Antártida en 1903-05 y 1908-10.

Jean-Baptiste, hijo del fundador de la neurología, Jean-Martin Charcot, cambió la medicina por los hielos y fue hasta su muerte explorador polar. El beri-beri padecido a bordo resultó de la modernización de la despensa, abastecida ya con latas de conserva y abundante vino. La humedad del contenido de sus latas y el calor de su esterilización degradaron las vitaminas, carencia de la que pudo recuperarse por una dieta de filetes de foca.

¿Por qué Charcot sufrió el beriberi en sus dos viajes, mientras que otros oficiales permanecieron exentos? Probablemente por culpa de un defecto congénito en el metabolismo de la vitamina, del que ya existen ejemplos, y que lo hizo más sensible a la carencia. Médico a la postre, dio una autodescripción del beri-beri cabal y exacta.

El comienzo de la investigación sistemática de las vitaminas coincidió con el final del segundo viaje. Probablemente, su barco fue el último en sufrir un estado carencial, pero el desarrollo del conocimiento de la tiamina no ha dejado de plantear



Charcot (tercero por la derecha) *y sus oficiales en su segundo viaje a la Antártida*

problemas. En los años cuarenta se observó que el consumo de harina de trigo refinada sin salvado estaba provocando carencias sutiles de tiamina en los países más ricos. Carencias que a veces se relacionan con las lesiones de la enfermedad de Alzheimer. Para remediarlas se aconsejan complementos vitamínicos. La carencia de tiamina puede también desencadenarse por uso de sueros glucosados intravenosos en pacientes con pocas reservas, por problemas de absorción intestinal y por exceso de café o té.

El núcleo más expuesto a las enfermedades carenciales lo hallamos en las grandes ciudades, donde coinciden personas desarraigadas, dietas baratas pobres en proteínas y ricas en hidratos de carbono, pan, pasta italiana y, sobre todo, alcohol, que necesita altas dosis de vitamina para su metabolización. Basta un simple proceso febril o una inyección glucosada para que estas personas desarrollen un cuadro confusional agudo al descompensar su escasa reserva vitamínica.

A. Gimeno Alava
Hospital U. Ramón y Cajal, Madrid

Diagramas de fase

Más allá del grafito

Los términos sólido, líquido y gaseoso designan los distintos estados de la materia. Las relaciones entre estados de una misma sustancia o materia, en función de la temperatura y la presión, se describen mediante diagramas de fase o diagramas de equilibrio.

Los químicos entienden por alotropía, o polimorfismo, la existencia de un elemento en más de una forma física, diferencias que pueden residir en el enlace o en la red cristalina. Una misma sustancia puede cristalizar en diferentes formas alotrópicas con propiedades físicas y químicas radicalmente distintas; así, el carbono presenta dos formas alotrópicas, grafito y diamante, de igual composición y estructuras muy diferentes. El grafito es negro, opaco, blando y conductor de la electricidad, mientras que el diamante es transparente, aislante y muy duro. Las condiciones de síntesis de estas dos fases vienen determinadas por el diagrama de fases del carbono.

Si en lugar de disponer de una única especie, tenemos materiales formados por diferentes sustancias, se introduce un nuevo elemento en el diseño de los diagramas: las proporciones de cada una de las sustancias. Ese hecho incrementa la complejidad de dichos diagramas. Un ejemplo lo observamos en el sistema $CaCO_3$– SiO_2–Al_2O_3, que es la base del cemento aluminoso, en el que se encuentran más de 18 fases diferentes en función de la temperatura y composiciones relativas.

Las reacciones entre fases se dan entre casi todos los compuestos. Muchas encierran un notable interés técnico, lo que convierte a los diagramas de fase en una herramienta indispensable en la investigación básica y aplicada.

En un diagrama de equilibrio, las fases se localizan de manera sencilla; para un rango de temperaturas y composiciones se define una región donde las fases son constantes. Estas regiones están determinadas por líneas y puntos característicos: eutécticos, peritécticos y eutectoides, que determinan los equilibrios entre las diferentes fases. (El eutéctico representa el punto de fusión más bajo de cualquier mezcla de dos sólidos; es la temperatura mínima para la existencia de la fase líquida. El eutectoide de un diagrama de fases es un punto en que una solución sólida está en equilibrio con los dos sólidos que la forman. Un punto peritéctico representa un sistema condensado invariante; existen tres fases en equilibrio, dos soluciones sólidas y un líquido.)

Un diagrama donde se observan estos elementos básicos y ha tenido gran importancia en el desarrollo de la sociedad industrial es el diagrama de fases del acero. La fase estable a temperatura ambiente rica en hierro es la ferrita (fase α): presenta una gran ductilidad, pero es blanda y acepta muy poco carbono; por contra, la cementita (Fe_3C) es muy dura, aunque quebradiza. En consecuencia, nos interesa una fase rica en hierro, pero con un mayor contenido de carbono que la ferrita. Si miramos el diagrama de la figura, esta fase es la austenita (fase γ), pero sólo es estable por encima de 725 ºC. Si se enfría lentamente un acero austenítico, de suerte que se establezca el equilibrio entre fases, obtendremos materiales formados por ferrita y perlita (eutectoide) o cementita y perlita si su contenido en carbono es respectivamente inferior o superior al 0,77 %. El hecho de encontrarse a un lado u otro del eutectoide confiere al material una microestructura y composición diferentes y, por tanto, propiedades distintas.

Suelen agregarse dopantes (titanio, wolframio, silicio u otros) para disminuir la corrosión del acero, aunque éstos provocan cambios radicales en el diagrama, variando la temperatura y composición del eutectoide (perlita) y, en consecuencia, las propiedades.

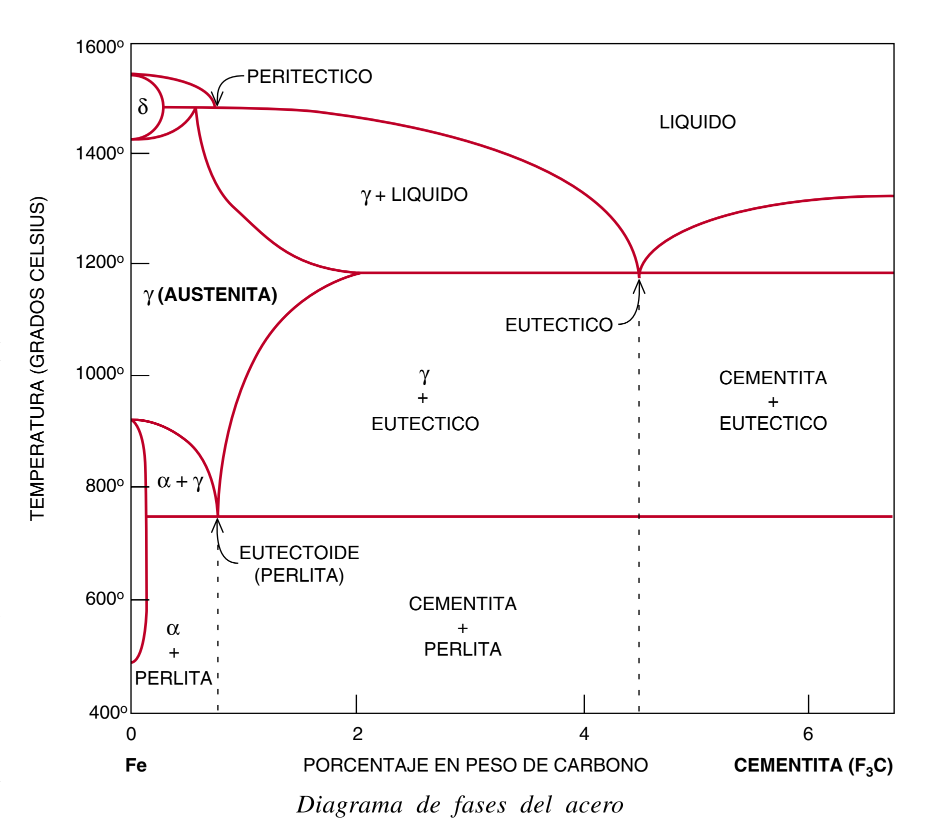


Diagrama de fases del acero

De ahí que cada caso requiera un estudio de su diagrama de fase.

En un diagrama de fases particular, según sean las direcciones de formación de soluciones sólidas se podrán hacer conjeturas sobre los mecanismos de dopaje a emplear y, por tanto, de las posiciones cristalográficas de substitución y la microestructura de los materiales. El diagrama, pues, no sólo contendrá información sobre las regiones de estabilidad de las diferentes fases, sino que aportará datos sobre la composición, estructura y microestructura de los materiales.

En un diagrama de fase se halla compendiada la información sobre la composición, compatibilidad y estabilidad de los compuestos inorgánicos. Dichos diagramas ilustran el comportamiento de un sistema multicomponentes en función de la temperatura, delimitando los rangos de estabilidad de las fases en términos de estequiometría y temperatura. Así, los diagramas de fase son esenciales para algunos compuestos inorgánicos típicos con interesantes propiedades y aplicaciones; por ejemplo, en el campo de los ferroeléctricos como el $BaTiO_3$, en el de los cerámicos aislantes, $MgAl_2O_4$, en el de los vidrios cerámicos, $Li_2Si_2O_5$, y en general en el campo de los superconductores, conductores iónicos, cemento o acero.

El conocimiento de los diagramas de fase permite evitar problemas como "la peste del estaño", que afecta a los órganos de las iglesias de países fríos, y que deriva de ignorar la transformación de fase del estaño metálico (blanco) a estaño gris, cuando desciende la temperatura. Esa es la causa de que se destruyan los tubos de los órganos antiguos. La utilidad de los diagramas de fase está en la posibilidad de predecir las transformaciones y la microestructura resultantes.

MARÍA LUISA MARTÍNEZ SARRIÓN,
LOURDES MESTRES
y MANUEL MORALES
Depto. de Química Inorgánica
Universidad de Barcelona

Biodegradación

Métodos

Durante los últimos 15 años, coincidiendo con el auge de la biotecnología, se cifraron grandes esperanzas en la explotación del potencial metabólico de los microorganismos para eliminar residuos contaminantes procedentes de la actividad industrial. ¿Hasta qué punto se han cumplido las expectativas?

Los microorganismos poseen una asombrosa versatilidad metabólica. Aunque cada especie bacteriana esté especializada en un compuesto determinado, considerados en conjunto los microorganismos pueden asimilar la mayoría de los productos orgánicos naturales y muchos de los sintetizados por el hombre. Se trata de un fenómeno conocido y explotado desde hace mucho tiempo. Quizás el ejemplo más claro nos lo sirvan las plantas depuradoras de aguas residuales de las ciudades. El agua que entra en la planta contiene una cantidad importante de materia orgánica; metabolizada por complejas mezclas de microorganismos, éstos logran que, a la salida de la depuradora, el agua presente ya un porcentaje de materia orgánica lo suficientemente bajo como para que pueda verterse a los ríos o al mar. Los microorganismos de una depuradora tienden a estar especializados en el tipo de compuestos que habitualmente entran en ella. En parte por esta razón, hay depuradoras adaptadas al tratamiento de aguas residuales urbanas y otras especializadas en residuos industriales.

Sin embargo, no todos los compuestos se biodegradan con igual facilidad. Los que se resisten a la metabolización se denominan recalcitrantes. En las últimas décadas se ha multiplicado la cantidad de compuestos sintéticos que se han arrojado al ambiente. Muchos de ellos son recalcitrantes; tienden, pues, a acumularse. Algunos son, además, tóxicos, por lo que generan problemas de contaminación. Es justo en este aspecto donde las nuevas técnicas genéticas pueden ayudar a aliviar los problemas, facilitando el metabolismo microbiano de compuestos difícilmente biodegradables.

De unos años a esta parte se han venido aislando microorganismos capaces de metabolizar compuestos orgánicos tóxicos. Citaremos, a modo de botón de muestra, el tricloroetileno, cloroformo, tetracloruro de carbono, tolueno, fenoles, fenoles clorados, pesticidas organoclorados y compuestos poliaromáticos. Donde más casos prácticos se están resolviendo es en el tratamiento de residuos industriales recalcitrantes. En esencia, se trata de encontrar en lugares contaminados, o desarrollar en el laboratorio, bacterias que degraden los compuestos de interés, optimizar el proceso degradativo y desarrollar una pequeña planta depuradora especializada. Es la solución ideal para limpiar efluentes de industrias que no pueden verterse directamente a una depuradora urbana ni a un río. Si bien hasta la fecha sólo se han utilizado microorganismos que no han sufrido ninguna manipulación genética, los sistemas de depuración permiten utilizar también microorganismos modificados en el laboratorio, porque el proceso degradativo puede llevarse a cabo en sistemas cerrados en los que la bacteria descomponedora no se libera al ambiente. Muchos laboratorios trabajan ya en soluciones similares para eliminar residuos industriales muy recalcitrantes o muy tóxicos, como los bifenilos policlorados (PCB), o determinados compuestos poliaromáticos.

Un área de investigación muy activa, en la que se han obtenido resultados dispares, es el tratamiento de suelos agrícolas o de aguas subterráneas contaminadas por pesticidas. En los suelos agrícolas, aunque suelen albergar estirpes bacterianas que metabolizan el contaminante, la biodegradación ocurre muy despacio. Se han aducido varias razones para justificar esa lentitud. Se recuerda que estos compuestos suelen ser muy insolubles en agua y, por tanto, le cuesta a la bacteria acceder a ellos; se afirma también que la bacteria dispone de otras fuentes de carbono más fáciles de captar y asimilar, y, por último, se arguye que los suelos suelen ser pobres en nutrientes que aporten al microorganismo fósforo y nitrógeno.

Se ha intentado acelerar el proceso de biodegradación mediante la inoculación de grandes cantidades de la bacteria que descomponga el contaminante, enfoque que sólo ha tenido éxito en algunas ocasiones. Según parece, los altos niveles de bacteria introducida caen bastante deprisa ante la falta de nutrientes adecuados y a causa de problemas de competición con otros microorganismos, por lo que no tarda en establecerse un equilibrio en el que la bacteria pasa a coexistir con las demás manteniendo un nivel bajo, aunque constante, de individuos. En muchos casos, a lo largo de este proceso, y mientras la bacteria sobrevive, el nivel de contaminante disminuye. El éxito depende, no obstante, de muchos factores externos (temperatura, tipo de suelo, tipo de bacteria, etcétera), difíciles de controlar.



Bacteria degradadora de hidrocarburos. Muchas especies bacterianas utilizan hidrocarburos como fuente de carbono y energía. La foto muestra una de estas bacterias, aislada a partir de un suelo contaminado con petróleo, crecida sobre un medio sólido. Cada colonia (puntos circulares en la foto, de aproximadamente 1 mm de diámetro) contiene del orden de un millón de bacterias que proceden de una misma bacteria progenitora

Se está ahora investigando la posibilidad de colonizar las raíces de las plantas con bacterias que degradan el pesticida contaminante. Muchas especies bacterianas forman asociaciones con raíces vegetales. Al tiempo que aprovechan los nutrientes que la raíz les suministra, degradan los contaminantes en la región cercana a la raíz, y de ese modo la planta no acumula el pesticida.

Por los grandes problemas técnicos que plantea, la descontaminación de acuíferos apenas si ha avanzado. Tampoco se ha dado con una solución eficaz y rápida de las contaminaciones de crudo. El petróleo está formado por multitud de hidrocarburos, muchos de ellos biodegradables y otros recalcitrantes en diverso grado. Tanto en medios acuáticos como en suelos la velocidad de biodegradación de hidrocarburos está limitada por la falta de nutrientes que suministren fósforo y nitrógeno a las bacterias y por la escasa solubilidad de muchos hidrocarburos. Los contados ensayos realizados fuera del laboratorio sugieren que lo más eficaz para limpiar contaminaciones por petróleo es añadir nutrientes (fertilizante oleofílico con nitrógeno y fósforo), con lo que se consigue que los microorganismos autóctonos capaces de degradar hidrocarburos aumenten en número. Con esa medida, de corroborada eficacia en la limpieza de tanques de petroleros, se triplica o cuadruplica la velocidad del proceso. El tratamiento de fracciones recalcitrantes de petróleo requiere métodos y microorganismos especializados.

En resumen, la biodegradación opera ya como método descontaminante en sustitución de métodos físico-químicos más drásticos. Existen, además, muchas aplicaciones potenciales a la espera de soluciones técnicas o del aislamiento o desarrollo de bacterias con la capacidad metabólica adecuada. Pero no debemos olvidar que el conocimiento de los procesos que experimentan en la biosfera los contaminantes introducidos por la actividad humana importa tanto como buscar métodos de descontaminación inocuos.

FERNANDO ROJO
Centro Nacional de Biotecnología, CSIC, Madrid

Biología celular

Reparación del ADN e inestabilidad del genoma

Entre los procesos básicos de la célula se citan de corrido la replicación del ADN, su recombinación, transcripción y reparación. La célula posee mecanismos reparadores suficientes que la protegen de las consecuencias deletéreas que se derivan de los daños infligidos en la molécula del ADN por agentes endógenos y exógenos.

La investigación de los mecanismos reparadores se remonta a 1949, cuando Albert Kelner y Renato Dulbecco descubren, cada uno por su lado, que los microorganismos y bacteriófagos incrementan de forma espectacular su capacidad de supervivencia ante los efectos letales de la radiación ultravioleta, si tras la exposición se incuban en presencia de luz visible. Se tardó siete años en demostrar que la responsable de este fenómeno biológico, bautizado con el nombre de *fotorreactivación*, era una enzima capaz de operar específica y exclusivamente sobre el ADN irradiado.

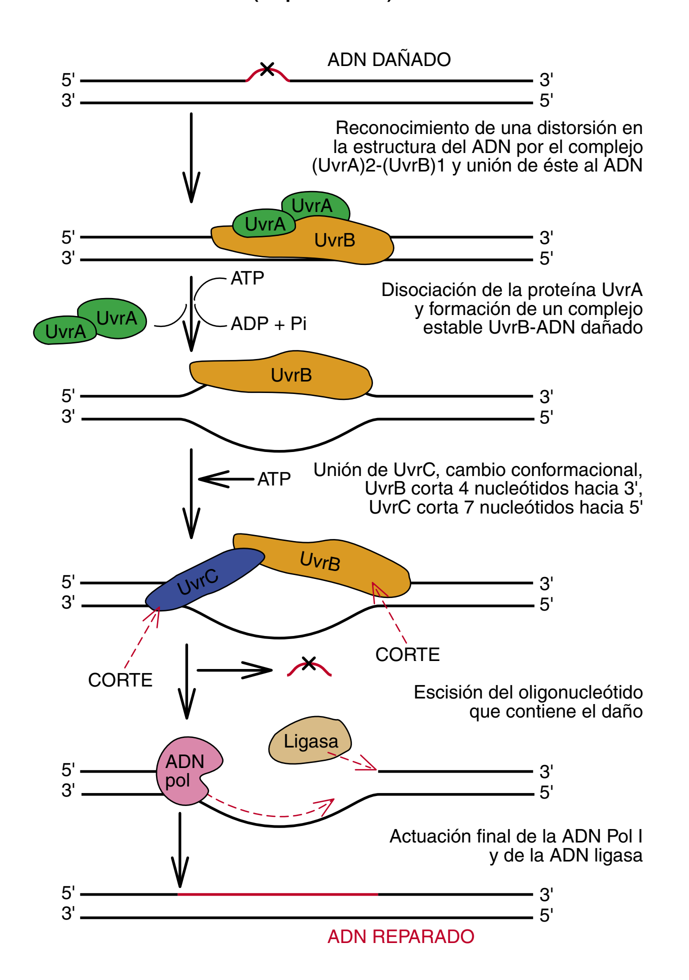
A comienzos de los años sesenta se demostró que el sustrato de la enzima fotorreactivante eran los dímeros de pirimidina inducidos por la luz ultravioleta. La razón de semejante retraso en la introducción del concepto de reparación del ADN tuvo que ver con la resistencia a aceptar la idea de la inestabilidad química de los genes.

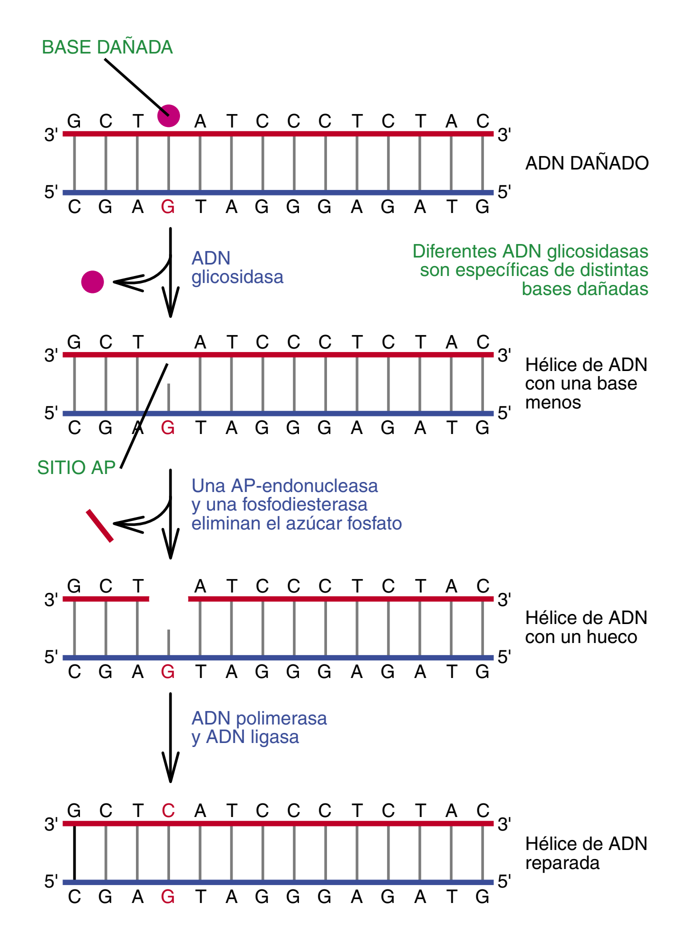
La aceptación de la inestabilidad intrínseca del ADN trajo en los años sesenta y setenta una avalancha de hallazgos. Recordemos, por ejemplo, el descubrimiento de la reparación por escisión de nucleótidos (Richard Setlow y William Carrier), la reparación por escisión de base (Tomas Lindahl) y la respuesta adaptativa de las bacterias a la alquilación del ADN (John Cairns y Leona Samson).

Las deficiencias en los mecanismos de reparación del ADN se asocian con frecuencia a un incremento de la inestabilidad del genoma. Pensando en tal asociación, se miran con esperanza los estudios moleculares que sobre dicha inestabilidad se están realizando en células deficientes, pues podrían ayudar a comprender los acontecimientos cromosómicos característicos de las células cancerosas. Estos incluyen una propensión a la multiplicación génica, una organización telomérica defectuosa y excesivas traslocaciones cromosómicas. En determinadas patologías aumenta, además, la tasa espontánea de intercambio entre cromátidas hermanas, con su consiguiente influencia en los mecanismos de recombinación (reordenamiento de la información genética).

La investigación molecular de los mecanismos de reparación en las células de mamífero ha dado ya pasos de gigante. Sabemos ahora, por ejemplo, que el cáncer colorrectal sin pólipos hereditarios (*HPCC* o *síndrome de Lynch*) obedece a una deficiente reparación de los apareamientos incorrectos de bases. A sus fallos se atribuye la acumulación de mutaciones por todo el genoma. Con el tiempo se alterarían genes importantes para el control de la proliferación celular, lo que provocaría la aparición de un cáncer y su posterior desarrollo.

De forma similar, la predisposición a padecer cáncer de piel de los sujetos con xeroderma pigmentosum,





*Modelos de los mecanismos de reparación por escisión de nucleótidos (*en procariotas, a la izquierda*) y por escisión de base (*derecha*). En la reparación por escisión de nucleótidos (NER), la lesión deja un hueco resultante que se rellena mediante una síntesis reparadora de ADN, en la que se emplea de molde la cadena complementaria sin dañar. En eucariotas, la NER sigue el mismo esquema general, pero el proceso es mucho más complejo y se utilizan mayor número de proteínas. En la reparación por escisión de base, una ADN glicosidasa específica rompe la base dañada al catalizar la hidrólisis del enlace N-glicosídico que la une al esqueleto azúcar-fosfato de la cadena de ADN. En la reparación por escisión de nucleótidos, las mismas proteínas escinden distintos tipos de lesiones*

otra enfermedad hereditaria, se explica por un defecto en la reparación por escisión de nucleótidos. En la misma línea podemos aducir lo que ocurre en ataxia telangiectasia; el gen defectivo que provoca la patología determina una proteína relacionada con la quinasa dependiente de ADN, enzima que se requiere en el procesamiento de los daños inducidos por las radiaciones gamma. Los aquejados de esta enfermedad sufren inmunodeficiencia, trastornos neurológicos y predisposición hacia diferentes tipos de tumores; además, son sensibles a las radiaciones y padecen inestabilidad del genoma.

Las drásticas consecuencias clínicas de los defectos referidos ponen de manifiesto la importancia de los procesos de reparación del ADN y la necesidad de proseguir su investigación. A este respecto, entre los enfoques más prometedores destaca el potencial que encierra el estudio de ratones que por manipulación genética carecen de proteínas específicas de los mecanismos de reparación.

Se han clonado genes clave en los procesos de reparación y se ha observado su vinculación con otros procesos celulares básicos, como la replicación del ADN, la recombinación y la transcripción. Así, las roturas de cadena doble y los huecos presentes en el ADN dañado se reparan a través de mecanismos asociados a la recombinación. Las células humanas reparan con mayor rapidez las regiones transcritas que las no transcritas y en ellas más la cadena de ADN que sirve de molde en dicho proceso que la cadena de ADN complementaria. Esta reparación preferencial se denomina reparación acoplada a la transcripción. Las células CS (síndrome de Cockayne) son incapaces de llevar a cabo dicha reparación preferencial. La reparación por escisión de nucleótidos usa los productos de unos 30 genes, siendo el factor de transcripción TFIIH un componente esencial de dicho mecanismo.

Carmen Pueyo de la Cuesta
Universidad de Córdoba

De cerca

Texto y fotos: Bernard Chaubet

Mamá pulgón

En el mundo de los insectos, a excepción de las especies sociales (hormigas, abejas, termes...), los comportamientos parentales son bastante raros. Lo más frecuente es que la descendencia quede abandonada a su suerte. Ciertas mariposas, por ejemplo, desovan en pleno vuelo, sin preocuparse del ambiente en que habrá de desenvolverse su progenie. En cuanto eclosiona, la oruga ha de buscarse su propio sustento.

En ocasiones, los huevos son depositados en un abrigo natural o creado para la ocasión; tal comportamiento denota una estrategia de protección elemental.

La hembra del pulgón *Elasmosthetus interstinctus* va mucho más allá en sus cuidados maternales. Una vez depositada la puesta, monta una atenta guardia, cubriendo con su cuerpo a su progenie antes y después de la eclosión. A modo de escudo, se inclina en la dirección del peligro.

Tras la eclosión de las chinches jóvenes, si éstas se desplazan, la madre sigue su movimiento. Como una sombrilla móvil, resguarda a sus pequeños reunidos bajo su cubierta. Por fin, tras la primera muda larvaria, la hembra abandona a su descendencia. Las pequeñas chinches conservarán todavía durante algún tiempo su instinto gregario; después, cada una seguirá su rumbo.

Elasmosthetus interstinctus vive en el abedul, donde no es rara. Se nutre de las hojas, absorbiendo el contenido celular de las mismas mediante su estilete. Podemos observar sus carrochas desde comienzos del mes de junio.



Así eligen pareja las hembras

Las hembras prefieren aparearse con machos vistosos. Su elección podría resultar de una interacción compleja entre instinto e imitación

Lee Alan Dugatkin y Jean-Guy J. Godin

Si preguntamos a bote pronto por el prototipo de galán, se nos responderá con una suerte de réplica del James Bond de turno: inteligente, con clase, arrojado y fogoso, atributos que atraen a cualquier mujer. Póngasele conduciendo un rutilante deportivo y se tendrá un cóctel casi irresistible.

No es exclusiva de la especie humana la tendencia de las hembras a arremolinarse alrededor de los machos más vistosos. En muchas otras, los machos con mayor éxito (los que dejan más hijos) suelen también ser los de cuerpo mayor o adornados de colores intensos, cuando no los que "alardean" con exhibiciones de cortejo más vigorosas.

La hembra suele ser más exigente en la selección de pareja. En parte ello se debe a que el macho puede producir millones de espermatozoides, mientras que los óvulos de la hembra son pocos y muy espaciados. La hembra puede ser más selectiva porque ha invertido más en cada gameto y en la prole. Y puesto que la disponibilidad de óvulos constituye un factor limitante del éxito reproductor, los machos tienden a competir por la atención de las hembras, no al revés.

Charles Darwin advirtió que la competencia por la pareja desempeñaba un papel importante en el éxito reproductor, proceso al que denominó selección sexual. En *El origen del hombre y la selección en relación al sexo*, publicado en 1871, sostuvo que cualquier rasgo que proporcionara al macho ventajas en el apareamiento y la fecundación se desarrollaría en una población, porque los individuos que gozaran de tales características producirían más descendientes que sus competidores. Si el rasgo en cuestión resulta ser heredable, los hijos que lo expresaran conseguirán, a su vez, un mayor éxito reproductor que sus competidores, y así de generación en generación. Además, Darwin propuso que algunas de tales características pudieron haber evolucionado porque atraían la atención de las hembras.

La idea de que la iniciativa y elección activa del macho parte de la hembra fue objeto de controversia desde su formulación, quizá debido a que las peleas entre machos pueden ser muy espectaculares. Luchan éstos entre sí, a veces en aparatosos duelos a muerte, para obtener el privilegio del apareamiento con la hembra. En comparación, la elección que la hembra realiza acostumbra ser más sutil.

A lo largo de los últimos 25 años se han ido acumulando pruebas en favor de la elección por la hembra. Son las hembras las que seleccionan activamente a su pareja en múltiples especies, sobre todo si los machos son menos agresivos y exhiben diferencias individuales en los caracteres sexuales secundarios: plumaje ornamental o alardes en el cortejo. Pese a todo, la manera en que las hembras seleccionan a su pareja, por qué lo hacen y cómo han evolucionado las preferencias de apareamiento siguen siendo temas debatidos entre los biólogos.

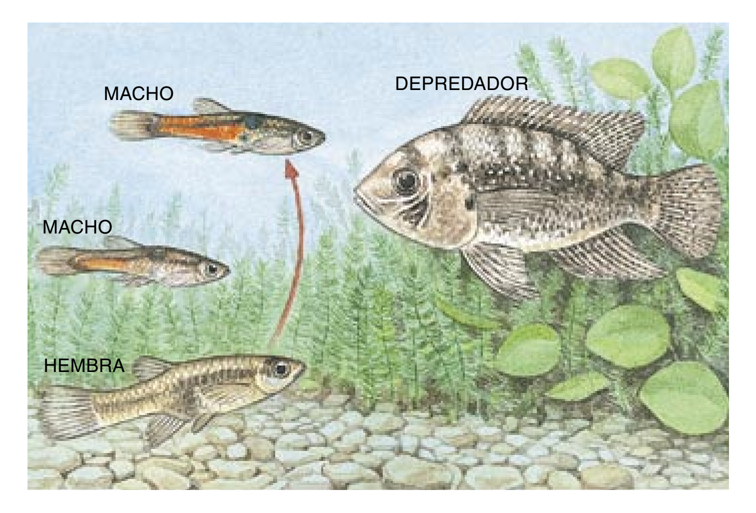
A la hora de escoger macho, una hembra exigente se enfrenta a una doble tarea. En primer lugar, debe buscarlo. Una misión nada fácil si se trata de una población dispersa o si el peligro de los depredadores le impide dedicar mucho tiempo a la labor. Encontrado un macho, ha de decidir si lo acepta o lo rechaza. A menudo, esa decisión exige cierto tiempo, dedicado a observar y comparar. En algunos sistemas de apareamiento, las hembras pueden encontrar un grupo de machos disponibles y compararlos de inmediato. Ocurre eso, a principios de primavera, con los machos de gallo de las artemisas (*Centrocercus urophasianus*), que se agregan numerosos y apretados en leks; en esas arenas de apareamiento comunal se pavonean y se exhiben para reclamar la atención. La hembra observa el despliegue de varios machos, todo indica que los compara, antes de aparearse con un afortunado preten-

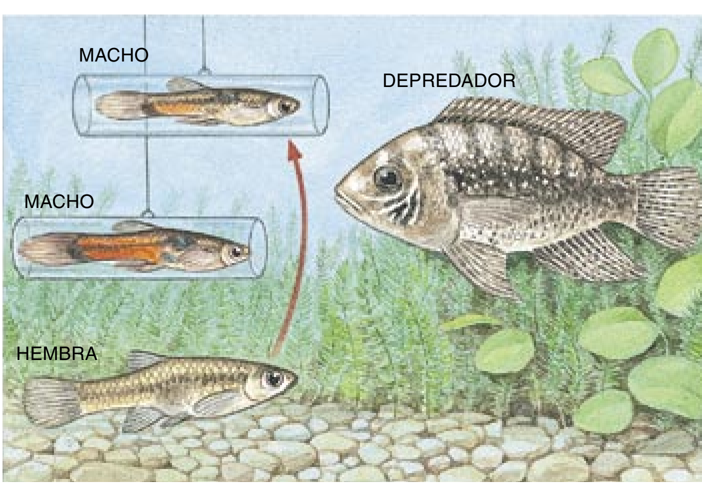
1. LAS HEMBRAS DE LOS GUPIS DE TRINIDAD son las que deciden cuando de elegir pareja se trata. Ellas prefieren machos de tonos más vivos o de color más anaranjado (*arriba, derecha*). Pese a todo, también los gupis ceden a la presión social. Si una hembra vieja muestra preferencias por un macho de colores apagados, la joven puede dejar de lado sus instintos para imitar la selección de pareja realizada por su mayor (*abajo, izquierda*).

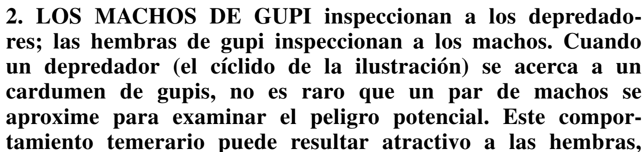
diente. A continuación, abandona el lek para anidar y criar a su pollada en otro lugar. De todas las parejas potenciales en un lek, sólo unos pocos machos reciben la atención de las hembras.

Pero los machos no siempre se manifiestan a la manera de muestrario o bombones en su caja. Lo habitual es que las hembras los vayan encontrando de uno en uno. De ello cabe presumir que la comparación entre machos resulta ahora una tarea cognitiva más compleja, puesto que hay que recordar rasgos de un individuo que ya no está delante. De acuerdo con algunos trabajos, las hembras pueden ordenar las características de machos que se les presentan de forma secuencial. Theo C. M. Bakker y Manfred Milinski, de la Universidad de Berna, observaron que las hembras del espinosillo o espinoso de tres espinas (*Gasterosteus aculeatus*) ajustan la elección de su pareja al atractivo relativo entre los machos presentes y los que hallaron antes. Era más probable que las hembras demostraran interés por un macho si su coloración nupcial roja brillaba más que la de otro ya conocido, y subía también la probabilidad de que rechazaran a un pretendiente cuya coloración era menos viva que la de su predecesor.

Pero elija a su pareja de entre una docena de gallos de las artemisas que danzan o de entre un par de peces de color bermellón, la hembra opta por el contendiente que más resalte. Prefiere, por lo general, los rasgos masculinos que







2. LOS MACHOS DE GUPI inspeccionan a los depredadores; las hembras de gupi inspeccionan a los machos. Cuando un depredador (el cíclido de la ilustración) se acerca a un cardumen de gupis, no es raro que un par de machos se aproxime para examinar el peligro potencial. Este comportamiento temerario puede resultar atractivo a las hembras, que tienden a elegir al pretendiente que se acerca más al depredador (*izquierda*). Los más valientes suelen ser los más coloreados; pero las hembras optarán por un contendiente menos vistoso si muestra mayor arrojo que su pareja de inspección (*derecha*). En el laboratorio, se preparan tubitos donde situar a los machos en la posición requerida.

más estimulan sus sentidos. (Estas observaciones de campo las acaban de revisar Malte Andersson, de la Universidad de Göteborg, Michael J. Ryan, de la Universidad de Texas en Austin, y Anne C. Keddy-Hector, del Instituto de la Comunidad de Austin.) Cuando se les da a elegir, las hembras de las ranitas arborícolas verdes (*Hyla cinerea*) se entregan a los machos que cantan más fuerte y con mayor frecuencia; las hembras de gupis (*Poecilia reticulata*) se dejan seducir por los machos de colores más vivos; y las hembras de ánade real (*Anas platyrhynchos*) por los machos que las cortejan con mayor insistencia. Ante tales preferencias, los machos han hipertrofiado determinados caracteres sexuales secundarios para atraerlas.

La observación indica que las hembras escogen. Pero no sabemos a ciencia cierta la razón de esa criba, en vez de aparearse al azar. ¿Cómo surgió y evolucionó la elección de la hembra? ¿Cuáles son los beneficios y costes individuales?

LEE ALAN DUGATKIN y JEAN-GUY J. GODIN iniciaron su colaboración en Trinidad, donde quedaron fascinados por el comportamiento de apareamiento de los gupis. Experto en evolución, Dugatkin da clases de zoología en la Universidad de Louisville. Godin, ecólogo, enseña biología en la Universidad de Mount Allison en New Brunswick, Canadá.

En algunos casos, las hembras podrían preferir un macho ruidoso o de colores vivos porque lo descubre en seguida. Acortar el tiempo invertido en buscar pareja reduce el riesgo de caer ante un depredador. Para muchas especies, la elección de pareja reviste, sin embargo, mayor complejidad. En aves y mamíferos la selección natural acostumbra primar las hembras que eligen parejas portadoras de algún beneficio directo en fecundidad, supervivencia propia o de la prole. Entran en ese epígrafe alimento, refugio seguro o incluso la posibilidad de menos parásitos.

En un estudio prolongado de la golondrina común (*Hirundo rustica*), Anders P. Møller, del CNRS, observó que las hembras prefieren aparearse con machos de plumas caudales largas. Resulta que los machos de cola larga están infectados con menos ácaros chupadores de sangre que sus congéneres de cola corta. Dado que tales parásitos pueden saltar de un ave a otra, las hembras que se aparean con machos de cola larga ganan al evitar la infección y producir un mayor número de pollos sanos que las hembras que se aparean con machos de cola corta. Por desgracia, debido a que la selección de una pareja que ofrece beneficios directos parece algo obvio, no se ha investigado con el debido rigor ese modelo evolutivo.

Cuando los machos no aportan recursos evidentes (alimentarios o de protección), las hembras pueden optar por los que parecen tener los mejores genes. ¿Cómo saben qué machos poseen buenos genes? ¿Por qué los machos no engañan mediante la simple simulación de los rasgos asociados con tales genes? En 1975 Amotz Zahavi, de la Universidad de Tel Aviv, sugirió que la hembra se limita a evaluar los rasgos indicadores de buena salud, hipótesis conocida por principio de desventaja. Los indicadores fidedignos, "costosos" de producir y mantener, deben estar asociados a los machos más vigorosos.

Mientras estudiábamos el comportamiento antidepredador en el gupi de Trinidad, recabamos algunas pruebas que respaldan el principio de desventaja. Cuando un pez depredador se acerca a un cardumen de gupis, los machos, a menudo en parejas, se aproximan cautelosos al peligro potencial para "inspeccionarlo". Este comportamiento arriesgado se ha observado en muchas especies; para los etólogos, con semejante aproximación al depredador pretenden reclamar la atención de las hembras acerca de su condición vigorosa. En estudios de laboratorio se ha comprobado que, si ninguna hembra merodea, no hay macho de gupi que destaque por hacerse el héroe ante el potencial depredador.

En nuestra opinión, la valentía demostrada durante la inspección del depredador podría ser atractiva para las hembras porque constituye un indicador fiable de buena salud. Los gupis menos vigorosos que intentaran "simular" competencia en el examen del depredador tendrían mayores probabilidades de perder la

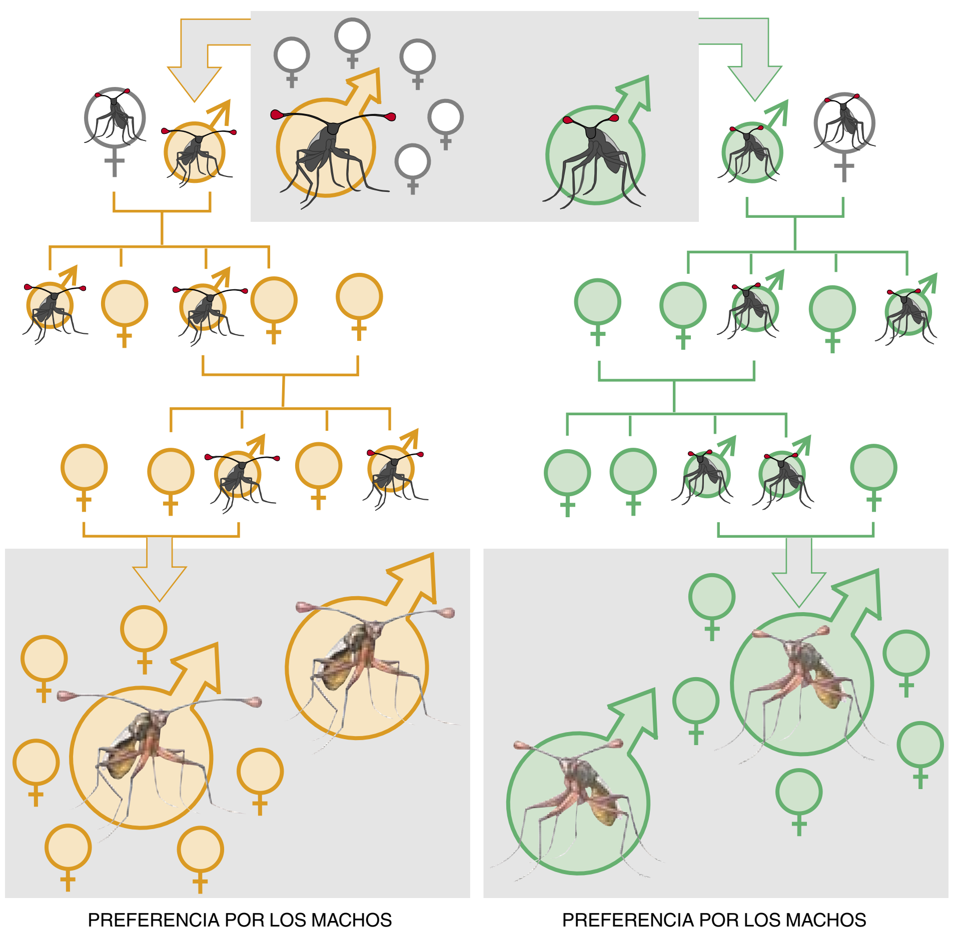
vida. Preparamos oportunos estanques, no muy grandes, y situamos los machos a diferentes distancias de un pez depredador; comprobamos que las hembras preferían efectivamente a los machos más intrépidos. Tal valentía parece guardar correlación con el color: los machos que nadan más cerca del depredador presentan mayor colorido. Volviendo a la naturaleza, las hembras podrían haber desarrollado, en el curso de la evolución, una preferencia por los machos vistosos, toda vez que el color anuncia valentía y buena complexión.

Expresada la preferencia por un rasgo determinado, puede producirse un proceso de selección desbocada. Ronald Fisher llamó en 1958 la atención de los biólogos evolutivos sobre este modelo, que sugiere la coevolución de un rasgo masculino y la preferencia femenina por el mismo. Las hembras que escogen aparearse con machos grandes producirán hijos grandes, así como hijas que mostrarán preferencia por los machos grandes. En determinadas circunstancias, este proceso se agudiza: se producen rasgos masculinos cada vez más exagerados y una mayor preferencia femenina por tales rasgos.

Se han encontrado signos de coevolución desbocada entre la coloración anaranjada del cuerpo en los gupis macho y la preferencia femenina por dicho carácter. Por su parte, Gerald S. Wilkinson y Paul Reillo, de la Universidad de Maryland, han presentado un ejemplo más nítido de selección desbocada en la mosca de ojos pedunculados (*Cyrtodiopsis dalmanni*). Las hembras de esta especie prefieren los machos que poseen los ojos muy separados. Mediante la cría selectiva de las moscas a lo largo de 13 generaciones, Wilkinson y Reillo generaron un doble linaje: el de machos con pedúnculos oculares largos y el de machos con pedúnculos oculares cortos. Las hembras de cada línea preferían el rasgo masculino de su linaje, es decir, las hembras descendientes de machos con pedúnculos largos preferían aparearse con machos de ese tenor, y lo mismo las hembras del linaje complementario con sus propios machos. En breve, la preferencia de las hembras coevolucionaba con el rasgo masculino seleccionado.

¿Cómo se originan las preferencias que determinan la selección de pareja? En algunos casos, las hembras revelan una propensión sensorial ante determinado rasgo, que, sin más, les atrae. Es la hipótesis defendida por Ryan y John Endler, de la Universidad australiana James Cook. Las hembras del xifo o portaespada (*Xiphophorus helleri*) prefieren machos con una larga "espada" en sus aletas caudales. Los machos de plati (*Xiphophorus maculatus*), una especie emparentada, carecen, sin embargo, de espada; pese a ello, Alexandra L. Basolo, de la Universidad de Nebraska, descubrió que, si fijaba espadas artificiales, de plástico, en estos machos inermes las hembras de plati los escogían de inmediato para reproducirse. En otras palabras, las hembras de plati albergaban una predisposición hacia las espadas largas, aunque las espadas no revelan nada acerca del estado de salud de los machos de plati.

Estos modelos evolutivos podrían operar por separado o en conjunción, aunque es difícil resolverlo por vía experimental. Las hembras de gupi podría decantarse por los machos anaranjados porque el color vivo manifiesta valentía o buena salud (es probable que los machos con pigmentos brillantes coman bien). Pero la preferencia pudo haberse originado porque las hembras sintonicen mejor con colores de una determinada



3. LA SELECCION desbocada puede modelar las preferencias de pareja en las moscas de ojos pedunculados. Las hembras acostumbran decantarse por machos de pedúnculos largos (*arriba, centro*). Pero cuando los investigadores utilizaron técnicas de cría selectiva para generar dos linajes de moscas —una en la que los machos presentan pedúnculos largos (*izquierda*) y otra en la que los pedúnculos son cortos (*derecha*)— descubrieron que las preferencias de las hembras evolucionaban junto con la longitud de los pedúnculos de los machos. Las hembras del linaje de pedúnculos largos preferían a los machos con pedúnculos largos (*abajo, izquierda*) y las hembras del linaje de pedúnculos cortos preferían a los machos con pedúnculos más cortos (*abajo, derecha*).

longitud de onda y evolucionaran después a través de un mecanismo desbocado.

Todos estos modelos parten de la premisa de que la opción de la hembra viene determinada por los genes. La investigación reciente, sin embargo, pone de relieve que la imitación, un factor social, influye también en la elección de pareja.

Entre los machos de un grupo, algunos parecen arrolladores. En un lek de gallo de las artemisas abarrotado, el mejor dotado consigue el 80 por ciento de las oportunidades de apareamiento. ¿Acaso es irresistible? ¿O quizás unas se han fijado en otras a la hora de escoger macho? A principios de los noventa, Jacob Höglund y Arne Lundberg, de la Universidad de Uppsala, y Rauno Alatalo, de la Universidad de Jyväskylä, con otros investigadores, iniciaron un estudio exhaustivo del fenómeno de la imitación y su incidencia en la elección en el gallo lira (*Tetrao tetrix*). Se sirvieron de muñecos de paja para simular hembras interesadas; pues bien, las hembras reales preferían los machos que "contaban con otras hembras" en su territorio.

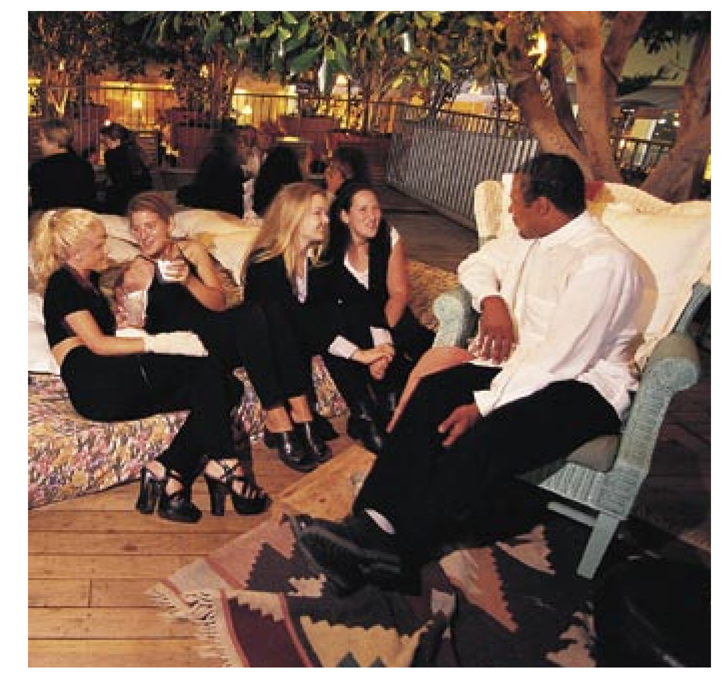
¿Por qué imitar? A lo mejor la imitación enseña a las hembras qué buscar en el macho. En nuestra batería de experimentos sobre imitación y elección de pareja entre los gupis, llegamos a la conclusión siguiente: resultaba más verosímil que las jóvenes imitaran la elección de pareja tomada por las mayores y avezadas que al revés. La mímesis, además, ahorra tiempo. Basarse en el juicio de otras permite hacerse un juicio más rápido y eficaz de un macho potencial, para disponer de más tiempo de forrajeo o salvaguarda de los depredadores.

A propósito de las especies cuyas hembras copian cabe plantearse qué proporción de la elección se basa en el instinto y qué proporción corresponde a la imitación. Con el fin de









4. LA SELECCION SEXUAL se realiza de muchas maneras. Durante la estación de celo, los machos de ciervo mulo o venado de cola negra desafían a sus rivales para que peleen por el derecho de reclamar la atención de las hembras disponibles. Los machos de canguro también luchan por sus parejas. Pero en las especies en las que la elección por parte de la hembra es el modo principal de selección sexual, los machos han desarrollado por evolución rasgos espectaculares para atraer la atención de las hembras. Los machos de pavo real alardean con sus colores espléndidos y el cuidado meticuloso del plumaje. Los machos humanos emplean estrategias más sutiles.

acotar la fracción pertinente al genoma y la fracción atribuible a factores sociales, en hembras de gupis del río Paria, en Trinidad, Dugatkin, uno de los autores, realizó un experimento de "titulación" conductual. De entrada, dejábase que una hembra eligiera entre dos machos, distintos en la extensión anaranjada de su cuerpo. Según lo esperado, las hembras preferían casi siempre al más coloreado. Luego, se creaba un escenario adecuado para la imitación: a la hembra experimental se le permitía observar a otra que aparentemente elegía al macho menos anaranjado por pareja.

¿Qué macho escogía entonces la hembra para sí? Por predisposición genética, la hembra se inclina hacia el macho más anaranjado; por presión del ambiente (factores sociales e imitación), tiende hacia el más deslustrado. Al final, la elección dependía del grado de divergencia cromática entre los machos. Cuando los que se presentaban juntos diferían poco, del orden del 12 por ciento en superficie anaranjada, o no más del 25 por ciento, la hembra elegía siempre al menos anaranjado de los dos. Sucumbía a la presión ambiente, que dominaba sobre su inclinación genética hacia el macho más vistoso. Ahora bien, si los machos diferían en una cuantía apreciable (40 por ciento) de naranja, la hembra dejaba en un segundo plano la imitación y se dejaba arrastrar por sus genes, que la impulsaban hacia el macho más anaranjado.

Queda patente, pues, que en los gupis existe un umbral de color, por debajo del cual las señales sociales gobiernan la elección de pareja y por encima del cual predominan los factores genéticos. Dugatkin investiga ahora la heredabilidad de la mímesis en las hembras de gupis. Aunque la imitación parece basarse en señales sociales, quizá los genes gobiernan la probabilidad de que una hembra tenga un comportamiento mimético.

Pese a que los seres humanos sean más complejos que los gupis y los gallos de las artemisas, podrían aplicárseles algunas reglas de elección de pareja en sus galanteos. Se dice que la mujer es más exigente que el varón cuando se trata de elegir pareja. En cuanto especie, se cumplen los criterios de elección por la hembra: los hombres, por lo común, evitarán el duelo a muerte por el favor de una joven. Las hembras escogen en razón de los rasgos que más les importe hallar: fogosidad, talento o saldo bancario.

Las mujeres pueden copiar la elección de pareja. Después de todo, la imitación importa mucho en diversos tipos de aprendizaje. Para determinar el papel de la mímesis en la valoración femenina del atractivo del varón, Dugatkin trabaja en una investigación de psicología social con Michael Cunningham y Duane Lundy, de la Universidad de Louisville. Los resultados, aunque provisionales, respaldan la idea de observación común según la cual las mujeres expresan mayor interés en salir con un hombre cuando otras lo encuentran también atractivo.

Lo que las hembras quieren

RASGO MASCULINO	PREFERENCIA FEMENINA	ESPECIES
Canto	Mayor intensidad	Chicharra pratense (tetigónidos)
	Mayor frecuencia	Sapo americano (*Bufo americanus*)
	Mayor duración	Ranita verde arborícola (*Hyla cinerea*)
	Mayor complejidad	Rana de Tungara
	Repertorio más extenso	Chingolito melodio (*Melospiza melodia*)
Exhibición de cortejo	Mayor frecuencia	Gallo de las artemisas (*Centrocercus urophasianus*)
Tamaño del cuerpo	Mayor tamaño	Cíclido cebra o prisionero (*Cichlasoma nigrofasciatum*)
Cola	Cola más larga	Golondrina común (*Hirundo rustica*)
	Mayor altura de la cola	Tritón crestado (*Triturus cristatus*)
	Mayor número de ocelos	Pavo real (*Pavo cristatus*)
Cresta	Mayor cresta	Gallo banquiva (*Gallus gallus*)
Pérgola	Pérgolas más decoradas	Pergolero satinado (*Ptilonorhynchus violaceus*)
Lista pectoral	Mayor lista pectoral	Carbonero común (*Parus major*)
Color del cuerpo	Mayor vistosidad	Camachuelo mexicano (*Carpodacus mexicanus*)
	Mayor área de color naranja	Gupi (*Poecilia reticulata*)

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

SEXUAL SELECTION. M. Anderson. Princeton University Press, 1994.

INTERFACE BETWEEN CULTURALLY BASED PREFERENCES AND GENETIC PREFERENCES: FEMALE MATE CHOICE IN *POECILIA RETICULATA*. L. A. Dugatkin en *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, vol. 93, n.º 7, págs. 2770-2773; 2 abril 1996.

FEMALE MATING PREFERENCE FOR BOLD MALES IN THE GUPPY, *POECILIA RETICULATA*. J.-G. J. Godin & L. A. Dugatkin en *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, vol. 93, n.º 19, págs. 10262-10267; 17 septiembre 1996.

SEX, COLOR AND MATE CHOICE IN GUPPIES. Anne E. Houde. Princeton University Press, 1997.

SEXUAL SELECTION AND MATE CHOICE. M. Ryan en *Behavioural Ecology: An Evolutionary Approach*, 4.ª edición. Dirigido por J. R. Krebs y N. B. Davies, Blackwell Science, 1997.

Tijeras y pinzas de láser

En el laboratorio se emplean ya láseres para atrapar células, una a una, o sus componentes. Con un haz para fijar y otro para cortar, los investigadores proceden a manipulaciones sutilísimas

Michael W. Berns

Los haces de luz intensos y puros, los láseres, son componentes rutinarios de impresoras y lectores de discos compactos. Lo que no significa que los láseres limiten su aplicación a tareas triviales. Imagine el lector que enfoca un haz sobre tal orgánulo del interior celular. Considere, además, que el haz bloquea en su sitio la estructura en cuestión, a modo de pinzas fijadoras. Mientras ese haz minúsculo retiene al componente celular, un segundo haz actúa de escalpelo o tijeras y ejecuta una tarea de cirugía fina en el orgánulo.

Incluso en un mundo como el nuestro, acostumbrado a los láseres, representaciones semejantes suenan a fantasía científica. Nada más falso. Lo mismo que el cirujano guía las micropinzas y las microtijeras a través del endoscopio para acometer una intervención quirúrgica sin apenas agredir el órgano, el biólogo celular puede utilizar "pinzas de láser" y "tijeras de láser" para sus propias manipulaciones en células y orgánulos, sin provocar lesiones.

Primero aparecieron las tijeras de láser. Hará unos 30 años, Donald E. Rounds y el autor sugirieron la posibilidad de emplear láseres para explorar la estructura y función de las células y sus orgánulos. Empezamos por definir los parámetros de nuestros haces (longitudes de onda y duración de las exposiciones, entre otros), para seguir determinando qué orgánulos podrían manipularse con haces luminosos que alterasen regiones intracelulares mínimas, de sólo 0,25 micrometros de diámetro. (El diámetro de un cabello humano se cifra en unos 100 micrometros.)

MICHAEL W. BERNS ocupa la cátedra Arnold y Mabel Beckman de la Universidad de California en Irvine. Preside el instituto del láser y clínica médica adscrito a dicho centro superior y fundado por Arnold O. Beckman.

Andando el tiempo, descubrí con mi grupo que las tijeras de láser podían aplicarse a la investigación de los cromosomas y el huso mitótico, que guía la separación de los cromosomas durante la división celular. Amén de tales orgánulos nucleares, los haces facilitaron el estudio de mitocondrias (centrales celulares de energía), así como de estructuras diversas: microfilamentos, microtúbulos y centrosomas (involucrados en el mantenimiento de la arquitectura celular y el transporte de moléculas dentro de las células).

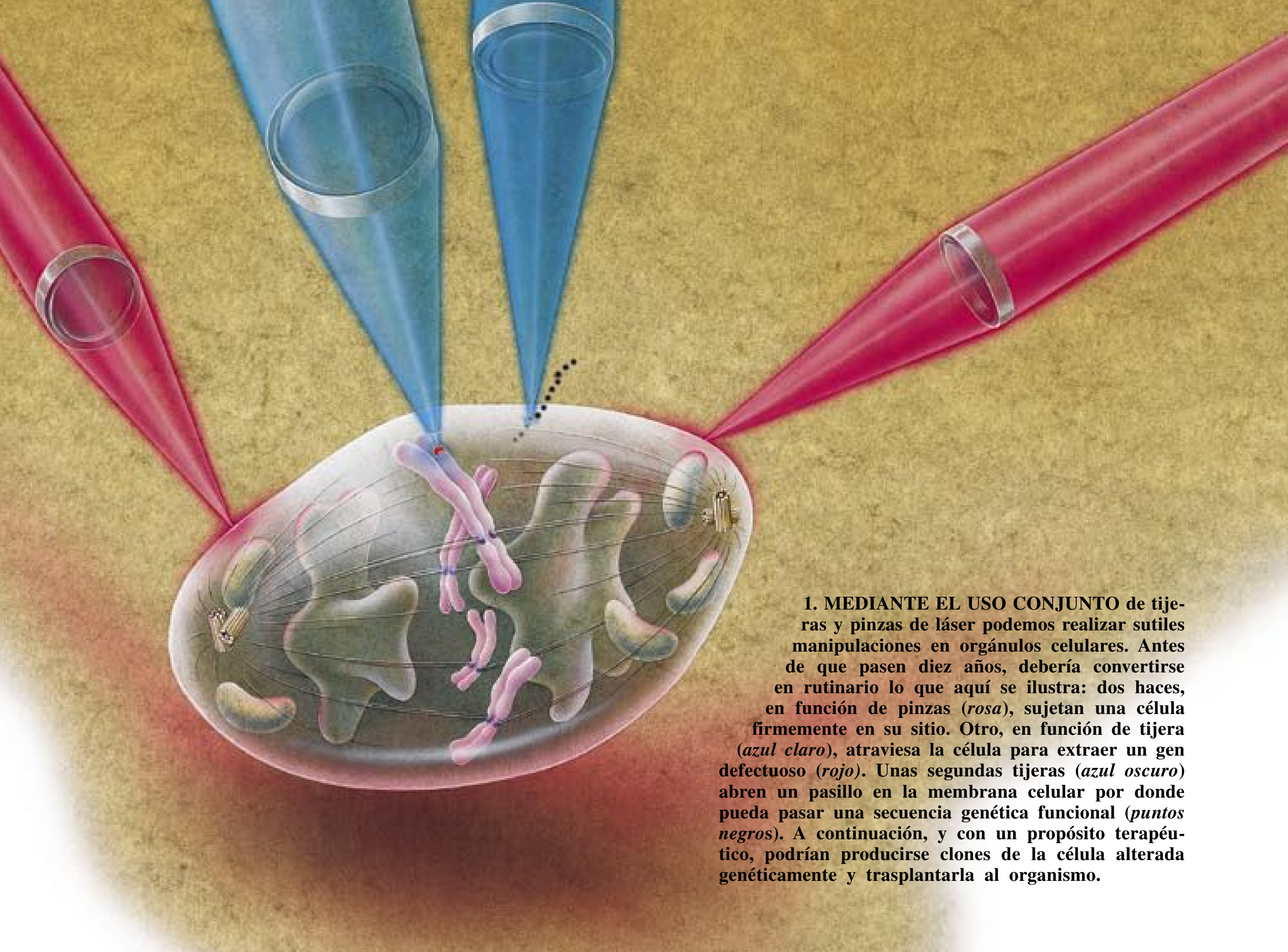
Aunque no siempre entendamos con exactitud el mecanismo en cuya virtud el láser desencadena los cambios que se operan en los componentes celulares, podemos provocar determinadas alteraciones que quedan fijas, pero sin comprometer la estructura o el entorno de la diana. Lo corroboran la microscopía óptica y electrónica, herramientas habituales en biología; ponen éstas de manifiesto que las tijeras de láser pueden producir cambios específicos en un cromosoma, en el propio interior celular. Con anterioridad, mi grupo había demostrado que las tijeras inactivaban una parte determinada de un cromosoma de células en división, en particular, una región que contiene genes que regulan la formación del nucléolo. Y lo que revestía mayor interés: la alteración persistía en la progenie de esas células, ya que todas ellas poseían versiones inactivas de los genes en la misma región.

La alteración producida en el cromosoma, una lesión de menos de un micrometro, aparece en forma de región clara si observamos la célula con un microscopio óptico de contraste de fases. Con microscopía electrónica de transmisión, que permite de 10.000 a 100.000 aumentos, se percibe que esa región corresponde a una alteración estructural definida; se advierte, además, que el material cromosómico que hay a cada lado de la lesión y el citoplasma que rodea al cromosoma parecen incólumes. El aspecto que ofrece esta región al microscopio de contraste de fases obedece a un cambio en el índice de refracción, no a la remoción física de material (el láser cambia las propiedades químicas y físicas del cromosoma sin destruirlo).

Otro tanto cabe decir a propósito de la membrana celular; para estudiarla basta una ligera perturbación de su fluidez. Con láser pueden producirse incisiones de un micrometro en la membrana, que se sellan en una fracción de segundo. Mediante esta técnica de optoporación (producción de poros por métodos ópticos), se introducen moléculas en la célula al abrir los poros sin rasgar la membrana de forma permanente.

La optoporación podría aplicarse sobre todo a la manipulación genética de las plantas, cuyas paredes celulares son rígidas e impenetrables si las comparamos con la membrana de la célula animal. En Irvine, he recurrido, con Hong Liang, a la optoporación para insertar genes en células de arroz. De esas células genéticamente modificadas se desarrollaron plantas enteras, donde cada célula portaba y expresaba los genes introducidos. Este trabajo, junto con el de la inactivación de genes del nucléolo, demuestra que las tijeras de láser sirven para insertar o para delecionar genes.

En Europa se han utilizado esas tijeras para manipular gametos humanos (espermatozoides y óvulos) en el marco de la implantación asistida. Las tijeras reducen o eliminan una



1. MEDIANTE EL USO CONJUNTO de tijeras y pinzas de láser podemos realizar sutiles manipulaciones en orgánulos celulares. Antes de que pasen diez años, debería convertirse en rutinario lo que aquí se ilustra: dos haces, en función de pinzas (*rosa*), sujetan una célula firmemente en su sitio. Otro, en función de tijera (*azul claro*), atraviesa la célula para extraer un gen defectuoso (*rojo*). Unas segundas tijeras (*azul oscuro*) abren un pasillo en la membrana celular por donde pueda pasar una secuencia genética funcional (*puntos negros*). A continuación, y con un propósito terapéutico, podrían producirse clones de la célula alterada genéticamente y trasplantarla al organismo.

parte pequeña de la zona pelúcida de óvulos fecundados *in vitro*. Los embriones se colocan entonces en el útero, donde la reducción en el espesor de la zona pelúcida facilita, así parece, la implantación. Esta reducción en el espesor también puede lograrse por técnicas tradicionales, pero el láser no requiere productos tóxicos que dañan el embrión.

Los estudios más completos en humanos realizados hasta el momento (por el grupo de Severino Antinori en Roma) estiman un aumento de un 50 por ciento en la tasa de embarazos entre más de 200 mujeres cuyos embriones habían sido sometidos a reducción lasérica de la zona respecto a mujeres no sometidas al tratamiento. En Estados Unidos, han comenzado los ensayos de reducción de la zona pelúcida por láser. En Israel se está a la espera de la aprobación gubernativa.

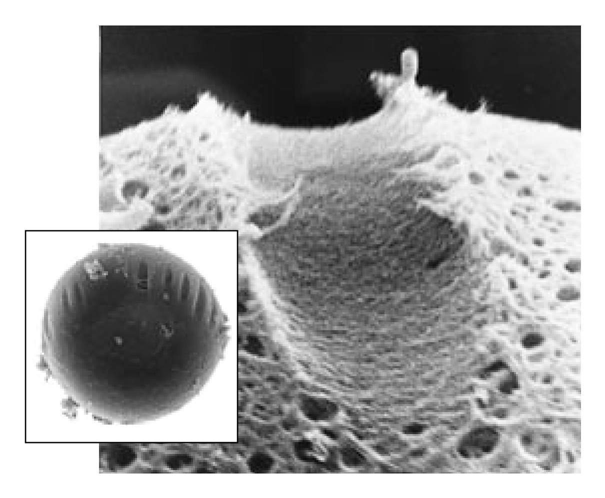
En colaboración con el grupo de Nancy L. Allbritton en Irvine, mi equipo se sirve de las tijeras para abrir células, de suerte que sus componentes químicos puedan analizarse a voluntad. Aprovechamos lo que en otras circunstancias constituye un efecto secundario negativo del uso del láser. Nos referimos a la formación de una nube minúscula de gas ionizado, al microplasma que se genera cuando se focaliza el láser en el portaobjeto de vidrio sobre el que descansa la célula. La expansión y contracción del microplasma provoca tensiones mecánicas que, a su vez, pueden rasgar la célula. (Los médicos aprovechan un efecto similar, aunque a escala mayor, para pulverizar cálculos renales y cataratas mediante una onda de choque emitida por el láser.)

Colocando un tubito capilar encima de la célula, podemos recoger sus componentes y analizarlos en una suerte de instantánea de su bioquímica en ese momento. Esta técnica posibilita un sinfín de aplicaciones de química analítica celular. Se pretende, sobre todo, determinar la identidad y concentración exacta de las proteínas oncológicas.

En todas las aplicaciones de las tijeras, debe buscarse precisión y selectividad. La precisión remite al direccionamiento del láser sobre el objetivo; la selectividad alude a la alteración controlada de la diana, que deja intactas las zonas circundantes.

Gracias a la calidad de los elementos ópticos de los microscopios actuales no resulta difícil conseguir la precisión deseada. Los objetivos tienen un acabado de fabricación perfecto y presentan corrección cromática en el rango del espectro visible, para que todas las longitudes de onda enfoquen casi el mismo punto en el espacio; así, cuando se utilizan múltiples haces con diferentes longitudes de onda, podemos estar seguros de que enfocan sobre el mismo punto.

Con un objetivo corriente de aceite de inmersión de 100 aumentos, la física que gobierna el tamaño de una mancha focal de láser predice que dicho tamaño es un poco menor que la longitud de onda del láser. Así, un haz producido a partir de un granate de neodimio, itrio y aluminio (Nd:YAG) que opere a una longitud





2. ENTRE LOS LOGROS ALCANZADOS por las tijeras de láser se incluye la creación de surcos (*izquierda*) en la zona pelúcida que rodea a un óvulo fecundado de ratón (*recuadro*) para facilitar la implantación. Otro logro ha sido su utilización para eliminar una porción cromosómica en V (*derecha*) de una célula viva procedente de una rata canguro. La porción mide alrededor de un micrometro en su parte más ancha.

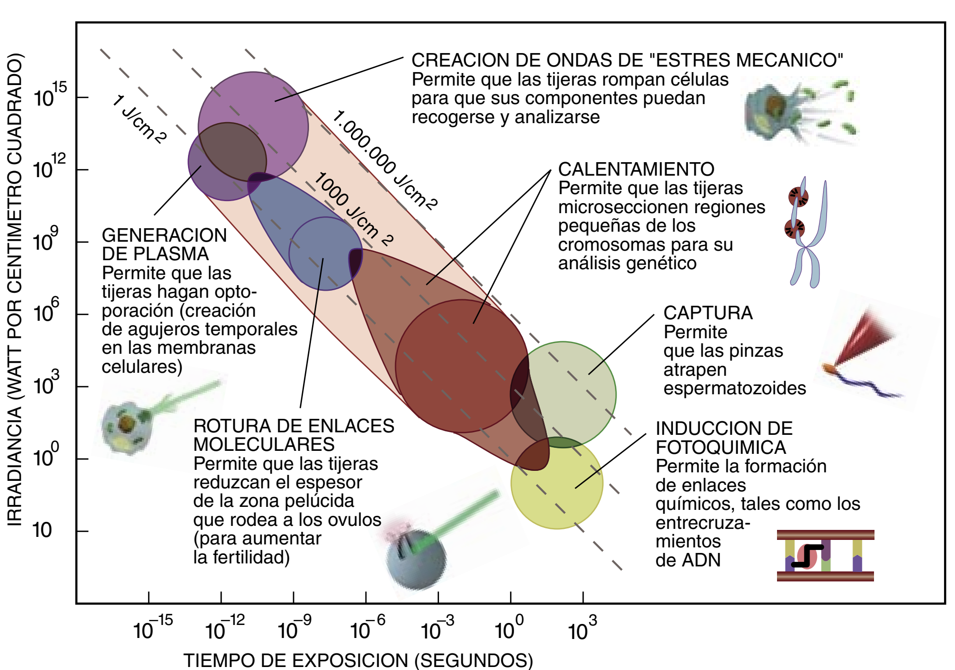
de onda de 532 nanómetros puede producir una mancha focal de 499 nanómetros. La precisión puede ser incluso mejor de lo que parece. El láser que hemos elegido produce una distribución gaussiana de la energía, es decir, la energía que forma la mancha focal se ajusta a una curva acampanada. Puesto que sólo el máximo de la curva puede tener energía suficiente para alterar un orgánulo particular, el punto efectivo puede ser bastante menor que el diámetro de la mancha focal medida.

También se puede alcanzar la selectividad (o alteración controlada). Lo prueban las aplicaciones desarrolladas hasta ahora. Sin embargo, por culpa de un conocimiento incompleto de las interacciones entre el láser y la diana biológica, se ignora cómo garantizar la selectividad en las nuevas aplicaciones (salvo la mostración empírica de su funcionamiento). No se trata de ningún fenómeno insólito. Durante un siglo se tomaron aspirinas sin que los expertos conocieran su desenvolvimiento molecular. Con ello no se niega que el conocimiento exacto del mecanismo de operación de un fármaco o una técnica conduzcan a una mejor aplicación. Por eso mismo, se trabaja con ahínco para desentrañar la compleja interacción entre láser y célula.

Diversos factores se oponen a la mejor comprensión de los efectos ejercidos por los haces. Medir y registrar lo que ocurre en regiones celulares de menos de un micrometro representa un reto imponente, lo mismo que controlar la energía de un láser en volúmenes tan sutiles. Pero no andamos a ciegas. Por estudios macroscópicos sabemos que, cuando el láser interacciona con tejido orgánico, se activan varios procesos físicos y químicos. Tales procesos pueden dispararse por la absorción de fotones individuales o por la absorción, casi simultánea, de múltiples fotones.

La absorción de un solo fotón podría limitarse a calentar la diana. O iniciar reacciones químicas que produzcan radicales libres u otros productos lesivos para las células. Los fotones de alta energía (como los del rango ultravioleta) pueden incluso romper enlaces moleculares y disgregar las moléculas en un proceso de fotoablación. Además, la absorción de múltiples fotones en un tiempo muy corto puede resultar equivalente a la absorción de un solo fotón de alta energía. Este tipo de absorción múltiple de fotones puede desencadenar reacciones químicas o conducir a la disociación molecular que se aprecia cuando se absorben fotones ultravioleta uno a uno. Cualquiera de estas situaciones, o su combinación, pudiera darse en una diana celular de menos de un micrometro.

Dejemos aparte las propiedades de absorción de la diana. Otro factor clave que condiciona el efecto ejercido



3. LA ENERGIA transmitida a las células (dosis de energía), medida en joule por centímetro cuadrado (J/cm^2), depende de la irradiancia de los haces láser y del tiempo que las células permanecen expuestas a la luz. (Las líneas diagonales discontinuas representan dosis constantes de energía.) Se indican algunos de los efectos que se pueden conseguir en las células con diferentes combinaciones de irradiancia y tiempo. Al menos un ligero calentamiento (*rojo*) acostumbra producirse en un amplio rango de energías. En rojo oscuro, se indica la zona donde el calentamiento constituye el mecanismo dominante.

por el haz reside en la irradiancia de la luz incidente (energía que llega a la superficie de la diana en un período de tiempo dado, medido en watt por centímetro cuadrado). Con pulsos de láser que expongan la diana a luz durante intervalos de microsegundos a femtosegundos (10^{-15} segundos), la irradiancia puede ser enorme. Se conocen los efectos que ejerce el láser en tejidos expuestos durante períodos de tiempo largos (cientos de segundos a minutos); por recordar algunos: calentamiento —capaz de desnaturalizar, coagular o vaporizar las moléculas— y reacciones químicas que engendran radicales libres, entre otros fotoproductos nocivos. Mucho menos se ha profundizado en los efectos producidos por irradiancias elevadas cuando se usan los volúmenes con los que trabajamos intracelularmente (una esfera de una micrometro de diámetro tiene un volumen menor de un femtolitro).

Entre los desafíos a plantearse destaca uno: definir el umbral a partir del cual una mayor irradiancia modificará el efecto ejercido en la diana; por ejemplo, descubrir a qué nivel el láser pasa de calentar la diana a generar ondas de choque inducidas por el microplasma. Aunque queda mucho por conocer sobre los efectos y umbrales de la irradiancia, no cabe duda de que se ven afectados por la duración del pulso de láser y por las propiedades de absorbancia de la diana y su entorno.

La investigación sobre umbrales de irradiancia se halla en plena efervescencia. Mi grupo se ha concentrado en el dominio por debajo del micrometro. De ellos cabe esperar un pronto avance sustantivo en el desciframiento de los mecanismos de interacción entre láser y diana, que agilice el desarrollo de aplicaciones subcelulares del láser. Pese a las cuestiones pendientes, con láser se pueden realizar cortes de suma precisión en casi cualquier componente celular que pueda observarse al microscopio óptico; podemos destruir o inactivar regiones específicas de las dianas.

No tardaremos en superar incluso esa limitación visual. Pienso en el empleo de moléculas que absorban luz (MAL) y estén diseñadas para descubrir y unirse a una secuencia de ADN del gen a manipular. De esta secuencia, demasiado pequeña para dejarse ver, podría ignorarse el lugar que tiene asignado en el cromosoma. Al irradiar la célula con luz de la longitud de onda correcta aportaría energía a las MAL, que a su vez inactivarían el gen unido. (Este proceso también podría activar el mismo u otros genes, mediante transferencia de energía capaz de desencadenar una cascada de reacciones químicas o inactivar un gen supresor.) El resto de la célula, aunque expuesta a la luz, no mostraría secuelas de la irradiación.

Las tijeras de láser, con sus pulsos de luz intensos y cortos, abrieron el surco que llevó a la cirugía microscópica de células y moléculas. Desde hace poco se les han unido las pinzas de láser.

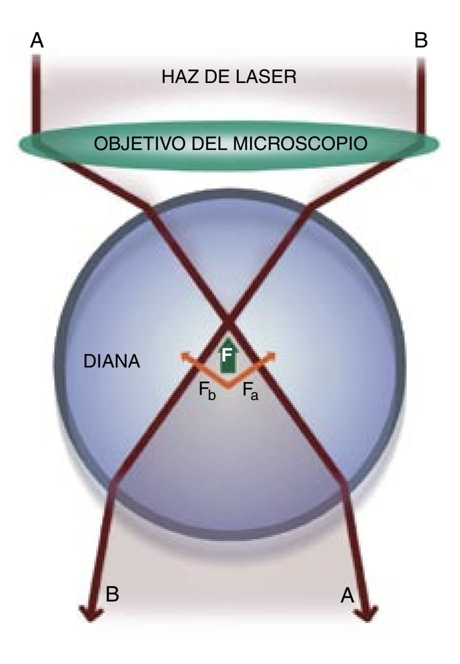
A primera vista resulta impropio el empleo de luz para atrapar y arrastrar objetos. De la naturaleza de la luz es calentar, quemar, medir o calibrar. No parece que le corresponda ejercer una fuerza capaz de sujetar o mover un objeto. Ahora bien, la cantidad de movimiento de la luz puede transmitirse a una diana. Pero cuando el sol brilla sobre nuestra cabeza y ejerce un empuje sutil contra nosotros, escapan a nuestra consciencia sensorial las fuerzas liliputienses resultantes. En cambio, esas fuerzas bastan para influir en los procesos subcelulares, donde las masas de los objetos son mínimas.

A mediados de los años ochenta, Arthur Ashkin descubrió que un haz láser de onda continua y baja potencia (menos de un watt) podía “atrapar ópticamente” bacterias y protozoos, uno a uno. Con su grupo demostró (primero con un láser verde-azul de iones de argón y después con el láser infrarrojo de Nd:YAG, al que las células son más transparentes) que podían atrapar y desplazar células enteras y sus orgánulos.

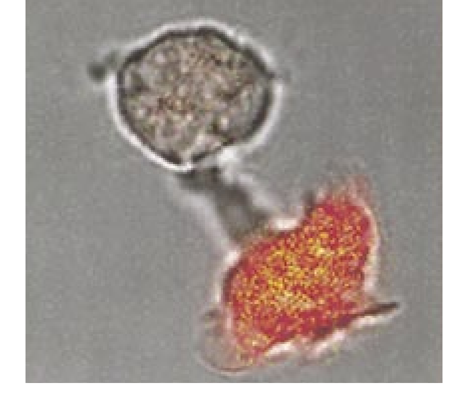
Steven Chu, Nobel de física, comprobó, con su grupo de la Universidad de Stanford, que las pinzas de láser atrapaban también moléculas. Conjugaron perlitas transparentes de poliestireno con los extremos de ADN enrollado y desnudo; emplearon fuerzas ópticas para empujar las cuentas y desplegar la molécula entera de ADN. Steven M. Block, de Princeton, y Michael P. Sheetz, de Duke, han utilizado el atrapamiento óptico de moléculas para motores de quinesinas, las estructuras proteináceas responsables de los latigazos de los flagelos o de la cola de los espermatozoides; esos motores agitan también las partículas y los orgánulos intracelulares.

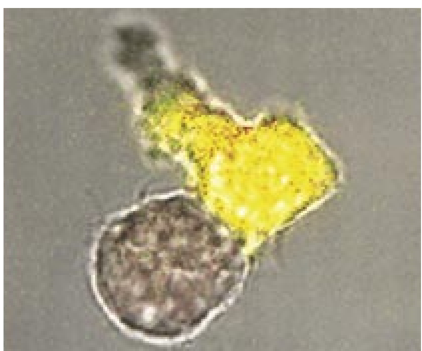
Un objeto pequeño y transparente al láser de una frecuencia particular refracta los rayos incidentes, curvando la luz. En virtud de la refracción, la cantidad de movimiento se transmite de la luz a la diana. Cuando los haces y la diana aparecen en geometría correcta, la cantidad de movimiento transferida a la diana tira de ésta en la dirección del haz incidente; de ese modo, el rayo puede sujetar a la diana en su sitio. Moviendo el haz, el operador de láser puede arrastrar la diana de un punto a otro.

Los haces de las tijeras y de las pinzas difieren en duración e intensidad. Mientras que las tijeras emplean pulsos cortos de alta irradiancia, las pinzas utilizan haces continuos de baja irradiancia. La diana debe ser transparente a las pinzas, de manera que el haz atraviese el objeto sin que se absorba energía y se convierta en calor destructivo o produzca un daño fotoquímico.



4. QUE EL LASER pueda aprehender objetos se funda en el principio físico de la conservación del momento. La refracción de cualquier par simétrico de rayos láser produce fuerzas. Un par típico (haces A y B) produce las fuerzas F_a y F_b, resultantes de la respuesta de la diana al cambio operado en la cantidad de movimiento de los haces luminosos. Si el punto focal se encuentra antes del centro de la diana, la suma de cualquier par de tales fuerzas es una fuerza total (la flecha vertical F) que tira de la diana en la dirección del haz. Un punto focal situado allende el centro de la diana empujaría a ésta. Los puntos focales situados a la izquierda o la derecha del centro moverían la diana hacia la izquierda o la derecha.





5. POLARIDAD DE LAS CELULAS *T*, confirmada en ensayos con pinzas de láser. Las células *B*, que provocan la liberación de calcio por las células *T*, se colocan, sirviéndose de pinzas, en la trayectoria de las células *T*. Si instalamos la célula *B* en uno de los extremos de la célula *T* quiescente, no se induce ningún cambio; la mancha fluorescente roja en la célula *T* permanece roja (*arriba*). Pero cuando la célula *B* se coloca en el otro extremo de la célula *T*, se produce una liberación de calcio que se pone de manifiesto por la fluorescencia amarilla (*abajo*).

Con un haz podríamos aprehender una célula o un orgánulo, que podrían todavía moverse; con un segundo rayo, se bloquea al objeto en su sitio. Las pinzas de láser acostumbran usar luz cuya longitud de onda oscile entre 0,7 y 1,06 micrometros y cuya potencia varíe de 25 a 500 miliwatt sobre una mancha focal de entre 0,5 y 1,0 micrometro de diámetro. El haz de tales características genera fuerzas en el rango del piconewton, suficiente para atrapar células y mover orgánulos.

Las pinzas de láser permiten nuevos tipos de experimentos. Mis colegas de Irvine Michael Cahalan, Bruce J. Tromberg, Xunbin Wei, Tatiana Krasieva y Paul Negulescu se sirvieron de ellas para analizar la relación entre la forma y la función de las células *T* del sistema inmunitario. La presentación de moléculas extrañas, o antígenos, por las células *B* del sistema inmunitario desencadena una cascada de reacciones, con un aumento en la concentración de iones calcio en las células *T*. Ese incremento promueve, a su vez, la especialización y proliferación de las células *T*, procesos esenciales de la inmunidad.

Las células *T* muestran una morfología polarizada, definida por su forma y dirección en que reptan. Con pinzas de láser de zafiro-titanio se atraparon células *B* y se situaron en distintos puntos de la superficie de la célula *T*. Cuando la célula *B* se colocó en el extremo posterior de la célula *T*, no se produjo ninguna respuesta; dos minutos después, aquélla se separaba de ésta. Pero la colocación de la célula *B* en el extremo anterior de la célula *T* provocó un inmediato incremento en la concentración intracelular de iones calcio, señal de que la respuesta en cascada se había disparado. Este descubrimiento se corresponde bien con la noción de que las células *T* y otros leucocitos emigran en direcciones específicas, en respuesta ante señales recibidas por receptores situados en sus extremos anteriores.

Las pinzas de láser atrapan incluso células de inusitada motilidad. Como demostraron Yona Tadir, Gregory J. Sonek y William H. Wright, a la sazón en Irvine, se puede aprehender un espermatozoide humano y manipularlo a voluntad. Y para investigar las fuerzas natatorias del espermatozoide, fuimos reduciendo gradualmente la fuerza que lo atrapaba hasta determinar en qué nivel podía escaparse. Del análisis de esta "fuerza de escape relativa" ha surgido un método para examinar la relación entre fuerza natatoria, velocidad y patrón de movimiento. El descubrimiento de que los espermatozoides que nadan en zigzag lo hacen con mayor vigor que los que siguen una línea recta, puede explicar ciertas observaciones clínicas; por ejemplo, los hombres con una proporción más alta de espermatozoides que naden en zigzag podrían ser más fértiles que los que producen espermatozoides que naden en línea recta.

A tenor de otra línea de investigación en que se recurrió al empleo de pinzas de láser, los espermatozoides extraídos del epidídimo (donde maduran y se recogen antes de la eyaculación) de individuos incapaces de eyacular nadan con una fuerza igual a sólo un tercio de la fuerza de los espermatozoides normales. (Parece ser que la adquisición del vigor entero requiere la maduración completa que ocurre durante su paso por el epidídimo.) Este resultado ayuda a explicar por qué se optimiza la fecundación cuando se inyecta directamente en los óvulos el esperma de estos pacientes, en vez de limitarse a la fecundación de óvulos en una placa de petri, donde el éxito depende de la fuerza natatoria.

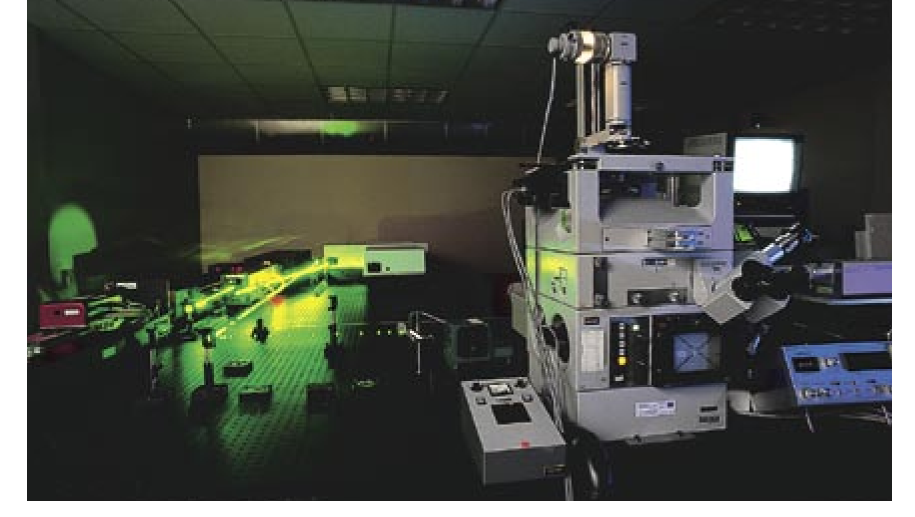
El análisis de la fuerza escapatoria relativa debería, por tanto, ser un método valioso a la hora de determinar si la esterilidad se debe a una motilidad baja. Asimismo, podría servir para ensayar tratamientos encaminados a mejorar la motilidad. En resumen, las pinzas podrían resultar útiles en el tratamiento clínico de la esterilidad y en el estudio de la motilidad de los espermatozoides.

En la aplicación de las pinzas a tales funciones debe procederse con delicadeza, porque la exposición a las pinzas podría dañar la motilidad por culpa de efectos térmicos y fotoquímicos difíciles de evitar. En verdad, y ante el uso de un haz continuo, con las pinzas hay que tener más cuidado con el calor que en el caso de las tijeras.

Tromberg, Sonek y Yagang Liu, al medir el calor generado por las pinzas, detectaron aumentos de temperatura en las regiones irradiadas de las células. Unieron una molécula sensible al calor, el laurdano, a membranas celulares artificiales (liposomas) o células cultivadas de ovario de hámster y registraron los cambios operados en la intensidad de la fluorescencia y en la emisión de longitudes de onda.

Con ese microtermómetro celular se detectó un aumento de 1,15 a 1,45 grados centígrados por cada 100 miliwatt de potencia láser en la mancha focal. Las pinzas podrían decuplicar dicha potencia; sin una oportuna disipación del calor, podrían producirse alteraciones fatales de las velocidades de las reacciones bioquímicas, inactivarse proteínas sensibles al calor (enzimas incluidas) e incluso precipitarse la muerte celular. Gracias a estas mediciones con laurdano se ha enriquecido el banco de datos sobre las interacciones entre el láser y su diana.

Si cada una por su lado, tijera y pinza, sirven de muchísimo, las técnicas que utilizan las dos, de forma secuencial o combinada, facilitan una mejor manipulación de las células. La primera aplicación conjunta de tijera y pinza de láser fue realizada por Romy Wiegand-Steubing, en mi laboratorio. Se sirvió de pinzas de láser infrarrojo de Nd:YAG para juntar dos células de mieloma humanas; con tijeras de



6. EL SISTEMA DE MICROHAZ de tijeras de láser incorpora un haz pulsante y un microscopio de contraste de fases. Los pulsos, que duran 10 nanosegundos, son visibles cuando la luz discreta brilla a lo largo de la trayectoria del láser. El sistema que aparece en la foto es el predecesor directo del sistema confocal de ablación-captura, cuyos haces, encerrados, no se dejan ver.

láser ultravioleta de nitrógeno cortó las membranas celulares colindantes. De ese modo, las dos células se fusionaron en una híbrida, que contenía los genomas de ambas. Las células fusionadas pueden combinar atributos de interés en una sola entidad; piénsese, por ejemplo, en la reunión de la capacidad de producir un compuesto útil de una célula con la de dividirse indefinidamente de la otra.

Yendo más allá en el trabajo de atrapar espermatozoides, el grupo de Karin Schütze recurrió a las pinzas infrarrojas para aprehender y guiar espermatozoides bovinos hasta el óvulo por un surco que había abierto en la zona pelúcida con las tijeras. Merced a esta técnica se obtuvo cierto porcentaje de fecundaciones, igual que en un ensayo similar con espermatozoides y óvulos de ratón.

Podría pensarse en un planteamiento parecido, si se demuestran su seguridad y eficacia, para su aplicación en manipulación de gametos en humanos, por no hablar de sus posibilidades en mejora animal. Aunque la precaución y la observancia rigurosa de las leyes deben guiar a los investigadores del campo de la reproducción asistida, éstos han mostrado interés en las pinzas y las tijeras de láser.

La combinación de tijera y pinzas permite manipulaciones sin precedentes en orgánulos y células enteras. En colaboración con Edward D. Salmon recurrimos a las tijeras de láser para proceder al corte de cromosomas que se encontraban en pleno proceso mitótico (o división celular). Con las pinzas de láser fuimos luego desplazando los fragmentos por el interior celular al objeto de estudiar las fuerzas ejercidas por el huso mitótico (la maquinaria celular que tira de los cromosomas replicados hacia los extremos opuestos de una célula en división).

Para nuestra sorpresa, no nos costó nada mover los fragmentos que estaban fuera del huso, pero no pudimos llevarlos al interior del huso. Se confirmaba la existencia de una "jaula" en el huso que bloquea la entrada de material extraño en su interior. Y los fragmentos cromosómicos recién producidos lo eran. Si consideramos que el material genético se transmite de una célula a la siguiente generación mediante la mitosis, entenderemos que la evolución haya desarrollado un sistema de bloqueo contra la entrada de material indeseado en la zona del huso.

El equipo de Rieder le está sacando más partido a ese utillaje. Han demostrado que las pinzas inhiben el movimiento de fragmentos de cromosomas cortados dentro del huso. Se puede, además, con tales técnicas, abordar sin agredir las fuerzas existentes en el huso mitótico. Habida cuenta del papel que éste desempeña en la división celular, poder desentrañar su funcionamiento habrá de conducirnos a un conocimiento más hondo de las enfermedades asociadas la división celular, cáncer y malformaciones congénitas entre ellas.

En el marco del programa sobre empleo de microhaces de láser en biomedicina promovido por el norteamericano Instituto Nacional de la Salud, hemos construido un equipo de trabajo que abarca dos pinzas y unas tijeras de láser incorporadas en un microscopio confocal de fluorescencia. Los haces de láser son ajustables, vale decir, pueden programarse a cualquier longitud de onda. Con la conjunción de todo ese instrumental en un mismo equipo se satisfacen a la vez múltiples exigencias del biólogo celular. El investigador puede observar células u orgánulos fluorescentes con el microscopio confocal durante y después del período de actuación de las pinzas y las tijeras. De ese sistema de captura y corte confocal controlado por palancas de mando (CATS) pueden extraer sumo provecho infinitos trabajos celulares y subcelulares, sin olvidar los encaminados a refinar los procedimientos de secuenciación de ADN.

En Irvine, Barbara Hamkalo y Al Jasinkas recurren a esa técnica para remover el centrómero de un cromosoma, la región donde los microtúbulos del huso se afirman. Se disputa si esta región interviene o no en procesos genéticos, ante las enormes dificultades que rodean el aislamiento y análisis del centrómero en busca de secuencias génicas activas. Las tijeras y pinzas de láser deberían ayudar a resolver la controversia.

Han pasado más de ochenta años desde que Albert Einstein sentó las bases teóricas del láser. A principios de los sesenta, los haces láser se convirtieron en realidad. Hoy los equipos de laboratorio que incorporan láseres permiten que el biólogo se transforme en cirujano celular, explorando y manipulando células y orgánulos. El empleo de ese nuevo utillaje habrá de repercutir en medicina, biología del desarrollo, citogenética y manipulación del genoma humano. Con el láser se adivina un futuro brillante para la investigación biológica y sus aplicaciones.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

FERTILIZATION OF BOVINE OOCYTES INDUCED SOLELY WITH COMBINED LASER MICROBEAM AND OPTICAL TWEEZERS. A. Clement-Sengewald *et al.* en *Journal of Assisted Reproduction and Genetics*, vol. 13, n.º 3, págs. 260-265; marzo 1996.

A SYNERGY OF TECHNOLOGIES: COMBINING LASER MICROSURGERY WITH GREEN FLUORESCENT PROTEIN TAGGING. A. Khodjakov, R. W. Cole y C. L. Rieder en *Cell Motility and the Cytoskeleton*, vol. 38, n.º 4, págs. 311-317; 1997.

LASER TWEEZERS IN CELL BIOLOGY. Dirigido por Michael P. Sheetz. Methods in Cell Biology series, vol. 55. Academic Press, 1998.

Cáncer del fenotipo mutador de microsatélites

Caracterizada por la acumulación de millones de mutaciones en secuencias repetidas, esa neoplasia representa una nueva vía molecular de formación de tumores esporádicos y hereditarios

Manuel Perucho

El control de la proliferación celular, alcanzado y refinado tras millones de años de selección natural, se derrumba ante la acumulación de mutaciones en determinados genes. Aludimos a los genes tumorales, así llamados porque contribuyen a la formación de tumores. Los genes tumorales desempeñan un papel regulador en la supervivencia o el crecimiento de las células. Si el control es positivo, hablaremos de oncogenes; si negativo, de antioncogenes o genes supresores.

Las mutaciones que ocurren en genes tumorales pueden venir inducidas por factores externos, del ambiente, o por errores espontáneos cometidos durante la replicación del ADN. Ignoramos en qué proporción contribuyen al desencadenamiento de un tumor las causas exógenas y en qué cuantía las endógenas.

Aunque la palabra cáncer es un término polisémico, que se aplica a condiciones patológicas diferentes, la mayoría de las células cancerosas, si no todas, comparten una profunda inestabilidad genómica. Lo vemos, por ejemplo, en el cáncer colorrectal, que puede inducirse a través de dos vías moleculares, la vía supresora y la vía mutadora. Pues bien, cada vía presenta una inestabilidad genómica distintiva. A la vía supresora le acompaña una inestabilidad cromosómica; a la vía mutadora, una inestabilidad de microsatélites. Hablando del ADN, se entiende por microsatélites secuencias repetidas en tándem, cuyas unidades de iteración son muy cortas. (Su enorme variabilidad las convierte en herramientas valiosas para confeccionar mapas genéticos.)

La inestabilidad cromosómica se manifiesta en el desarrollo de tumores con aneuploidía. Aneuploide es la célula que ha perdido su constitución diploide, es decir, un número duplicado de cromosomas, la mitad procedente del padre y la otra mitad de la madre. Pertenecen a este grupo de tumores con aneuploidía el 80 % de los cánceres de colon sin precedentes familiares (esporádicos) y los hereditarios de la poliposis familiar. Se caracterizan estos tumores por presentar pérdidas frecuentes de heterocigosidad (LOH) en múltiples *loci*, así como mutaciones que activan oncogenes e inactivan o bloquean genes supresores. En el caso del cáncer de colon, el oncogén *RAS* y los genes supresores *APC* y *p53* son los prototipos.

La mayoría de los tumores de colon hereditarios no polipósicos, así como el 15 % de los esporádicos, manifiestan una inestabilidad de secuencias repetidas simples, o microsatélites. Esta inestabilidad genómica define a los tumores de la vía mutadora, que son en su mayoría diploides o pseudodiploides. Además, se advierte en ellos una ausencia paradójica de mutaciones de los genes tumorales habituales en los tumores de la vía supresora, como *APC*, *RAS* y *p53*.

Los tumores de la vía mutadora se caracterizan por la acumulación de millones de mutaciones en microsatélites. Manifiestan, pues, un fenotipo mutador desorbitante para ese tipo de secuencias, denominado fenotipo mutador de microsatélites (“microsatellite mutator phenotype” o MMP).

Larry Loeb fue el padre de la idea del fenotipo mutador. La propuso, hace más de veinte años, para explicar la presencia en las células tumorales de un número de mutaciones muy superior del que cabía atribuir a la frecuencia espontánea de mutaciones de las células normales. Para Loeb, el cáncer sólo se manifiesta cuando una célula adquiere capacidad de generar mutaciones con una frecuencia mucho mayor que las células normales. Es decir, expresa un fenotipo mutador. El descubrimiento del fenotipo mutador de microsatélites proporcionó una prueba definitiva para la hipótesis loebiana.

Pero antes de proseguir en la descripción de los mecanismos moleculares que actúan en el desarrollo de los tumores del MMP de la vía mutadora recordaremos cómo se descubrió el fenotipo mutador de microsatélites. Abordaremos más tarde su comparación con los tumores de la vía supresora.

En 1991 comenzamos a estudiar la inestabilidad cromosómica en tumores de colon mediante el método de impresión de la huella dactilar (“fingerprinting”) de ADN ideado, un año antes, por John Welsh y Michael McClelland en el Instituto de Investigaciones Biológicas de California de La Jolla. El método parte de la reacción en cadena de la polimerasa (PCR), inventada por

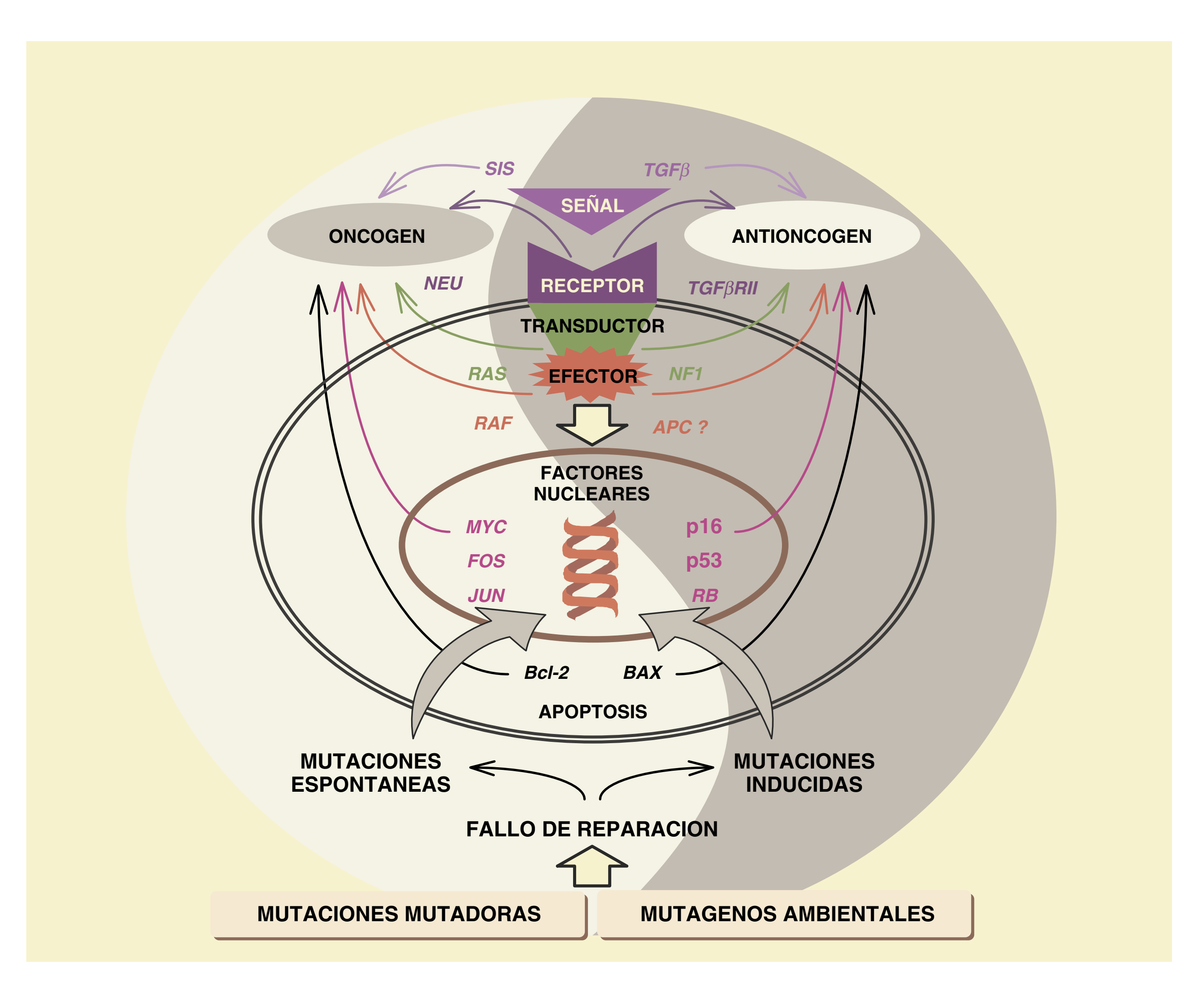
MANUEL PERUCHO investiga los mecanismos moleculares del cáncer; en particular, el papel de la activación mutacional de los oncogenes y el de la inestabilidad genómica en el cáncer gastrointestinal. Es profesor y director del departamento de oncogenes y genes supresores de tumores del Instituto Burnham en La Jolla, actividad que comparte con la docencia en la Universidad de California en San Diego. Se formó en la Universidad Complutense de Madrid, donde se doctoró en 1976.

Kary Mullis en 1985, y consiste en la multiplicación (amplificación) de secuencias de ADN distribuidas en posiciones aleatorias del genoma.

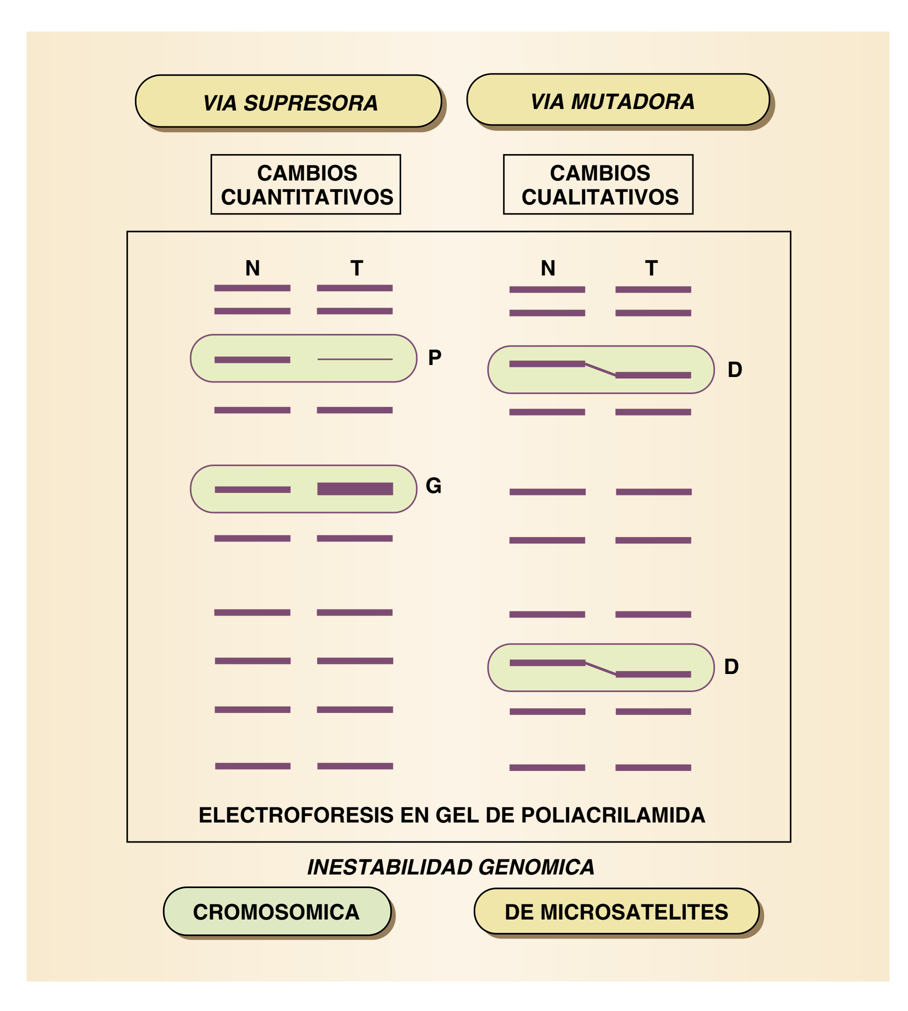
El método usa un solo cebador ("primer"), cuya secuencia, arbitraria, puede determinarla el investigador; de ahí el nombre de AP-PCR ("Arbitrarily Primed-Polymerase Chain Reaction") impuesto a la técnica. Podemos, por ejemplo, decidir la secuencia de un cebador arbitrario de veinte nucleótidos extrayendo, en veinte ocasiones, una de cuatro bolas —con los símbolos de las cuatro bases del ADN— que haya en una bolsa. Por cada cebador de secuencia distinta se amplifica un número de bandas diferentes, que proporcionan una huella dactilar del genoma.

En 1992, con Miguel Angel Peinado, Sergei Malkhosyan y Antonia Velázquez, de mi grupo de trabajo del Instituto de Investigaciones Biológicas de California, demostramos que los niveles de multiplicación *in vitro* alcanzados por la AP-PCR son cuantitativos; es decir, los cambios de intensidad mostrados en las bandas de la huella dactilar representan, a su vez, cambios en el número de copias en el genoma de las secuencias diana correspondientes.

El método de la huella dactilar del ADN mediante AP-PCR permite investigar el grado de aneuploidía de los tumores. Si las bandas de la huella dactilar del ADN del tumor son más débiles que en el tejido normal, entenderemos que en el tumor se han producido pérdidas de los cromosomas de procedencia de estas bandas. Por contra, si las bandas son más intensas en el ADN del tumor, entonces ha habido ganancias en el número de los cromosomas correspondientes. Ajustados



1. MECANISMOS ANTAGONICOS de control de la proliferación y supervivencia celulares. El diagrama resalta la dualidad y la simetría de los mecanismos celulares de control que rigen la respuesta ante los estímulos externos de crecimiento. Cualquiera de los eslabones —positivos o negativos— que integran la cadena de transducción de señales puede contribuir a la transformación neoplásica, si se alteran por mutaciones. El diagrama se limita a mostrar algunos ejemplos de genes tumorales positivos (oncogenes) o negativos (antioncogenes o genes supresores). Las mutaciones pueden producirse de forma espontánea durante la replicación del ADN; pueden resultar también de la interacción entre el ADN y agentes genotóxicos externos. Las causas de las mutaciones oncogénicas pueden ser endógenas o exógenas, innatas o adquiridas. Las mutaciones inducidas por carcinógenos del ambiente están mediadas por fallos en el proceso de inactivación de los mismos o de reparación de los daños inferidos a la molécula de ADN. A su vez, las mutaciones responsables de las mutaciones espontáneas (mutaciones mutadoras) pueden venir inducidas por mutágenos ambientales. Con ello se cierra el carácter circular y dualista del proceso.



2. IMPRESION DE HUELLAS DACTILARES de ADN. Se trata de un método para estudiar la inestabilidad cromosómica y la inestabilidad de microsatélites, los dos tipos de inestabilidad genómica subyacentes a las vías moleculares de oncogénesis del colon y recto. Este método se basa en una modalidad de la reacción en cadena de la polimerasa (AP-PCR). El diagrama representa las huellas dactilares ("fingerprints") de ADN de tejido normal (N) y tumoral (T) de pacientes de cáncer colorrectal. Los cambios cuantitativos detectados en las huellas dactilares son diagnósticos de la inestabilidad cromosómica que subyace bajo la aneuploidía característica de la vía supresora. Los cambios cualitativos son, por su lado, diagnósticos de la inestabilidad en secuencias repetidas simples, que subyace bajo la vía mutadora del cáncer del fenotipo mutador de microsatélites. P y G representan pérdidas y ganancias de secuencias genómicas, respectivamente. D simboliza deleciones intragénicas somáticas de las bandas de huellas dactilares correspondientes.

a ese criterio, podemos estudiar las desviaciones del estado diploide de los tumores (más copias de algunos cromosomas y menos de otros) y, en consecuencia, establecer un cariotipo molecular de tumores.

En colaboración con Peinado, ahora en el Instituto de Investigación Oncológica de Barcelona, y con Gabriel Capellá, del Hospital de San Pablo, también de Barcelona, hemos demostrado que los valores arbitrarios de daño genómico estimados por la AP-PCR encierran un significado pronóstico del cáncer de colon. En concreto: los tumores con un índice de daño genómico (IDG) superior a la media tienen peor pronóstico (baja supervivencia) que los tumores con un IDG inferior a la media. El índice de daño genómico se calcula comparando en tumores diferentes el número de bandas de las huellas dactilares que exhiben cambios de intensidad en función de las huellas dactilares del ADN del tejido normal.

Acometimos el análisis molecular cariotípico del cáncer de colon por el método de la impresión de huella dactilar de ADN. Muy pronto, sin embargo, observamos cambios sutiles en la movilidad de unas bandas de las huellas dactilares de ciertos tumores. Daba la impresión de que las bandas habían sufrido deleciones de algunos nucleótidos. Al secuenciar las bandas, se confirmó la aparición de deleciones somáticas de unos pocos nucleótidos de las secuencias. Estas deleciones sucedían siempre en repeticiones monótonas de desoxiadenosinas, una de las cuatro bases del ADN; las terminaciones en poly A de las secuencias repetidas *Alu* eran los ejemplos más abundantes. (La familia Alu está integrada por un conjunto de secuencias del genoma humano, dispersas y vinculadas entre sí, cada una de las cuales viene a constar de unos 300 pares de bases.)

Había también deleciones e inserciones en otras secuencias repetidas de dinucleótidos y trinucleótidos. Puesto que el fenómeno aparecía con cebadores diferentes, cabía suponer una tasa altísima de mutaciones en dichos tumores. A esta conclusión se llegó gracias al origen aleatorio de los fragmentos de ADN amplificados por la AP-PCR, fenómeno resultante, a su vez, del carácter estocástico de la secuencia del cebador.

El lector puede hacerse una idea más tangible del razonamiento, imaginándose una sala de conferencias totalmente a oscuras. Se le pide entonces al experimentador que determine el número aproximado de personas que integran la audiencia; para facilitarle la tarea, se le permite enfocar el patio de butacas con pulsos aislados de una linterna de haz estrecho. Si la mayoría de las veces que enfoca la linterna en direcciones distintas (impresiones de huellas dactilares con cebadores arbitrarios diversos) el experimentador observa rostros nuevos (bandas alteradas), llegará a la conclusión inevitable de que la sala (genoma) está abarrotada de asistentes (mutaciones).

Por un cálculo simple, estimamos que el número de mutaciones somáticas presente en estas células tumorales sobrepasaba los cientos de miles. Para determinar el número de mutaciones dividimos el tamaño del genoma —3000 millones de pares de bases (bp) o 3×10^9— por el tamaño de la muestra del genoma que se amplificaba en cada tanda de impresión de huella dactilar. Alrededor de 50 bandas de un tamaño medio de 600 bp hacían 30.000 o 3×10^4 bp. Por tanto, $3 \times 10^9 / 3 \times 10^4 = 10^5$ o 100.000 bp. Como veremos más adelante, éste fue un cálculo exce-

sivamente cauto. El número de mutaciones que ocurren en los tumores suele sobrepasar el millón. Semejante cifra de mutaciones constituía una prueba irrefutable de la hipótesis según la cual el cáncer resultaba de un fenotipo mutador.

La presencia de esta cantidad desorbitante de mutaciones somáticas, que además aparecían en todas las células del tumor, condujo a una conclusión inevitable: la maquinaria de replicación o reparación de estas células tumorales se hallaba profundamente averiada. Deducíase, pues, que las mutaciones en microsatélites eran consecuencia de otras mutaciones en ciertos genes, a saber, en genes que codificaban factores esenciales para mantener la fidelidad de replicación de dichas secuencias. Una vez mutado, el gen en cuestión promovía la aparición de muchas mutaciones más en el genoma. Las hemos llamado mutaciones mutadoras.

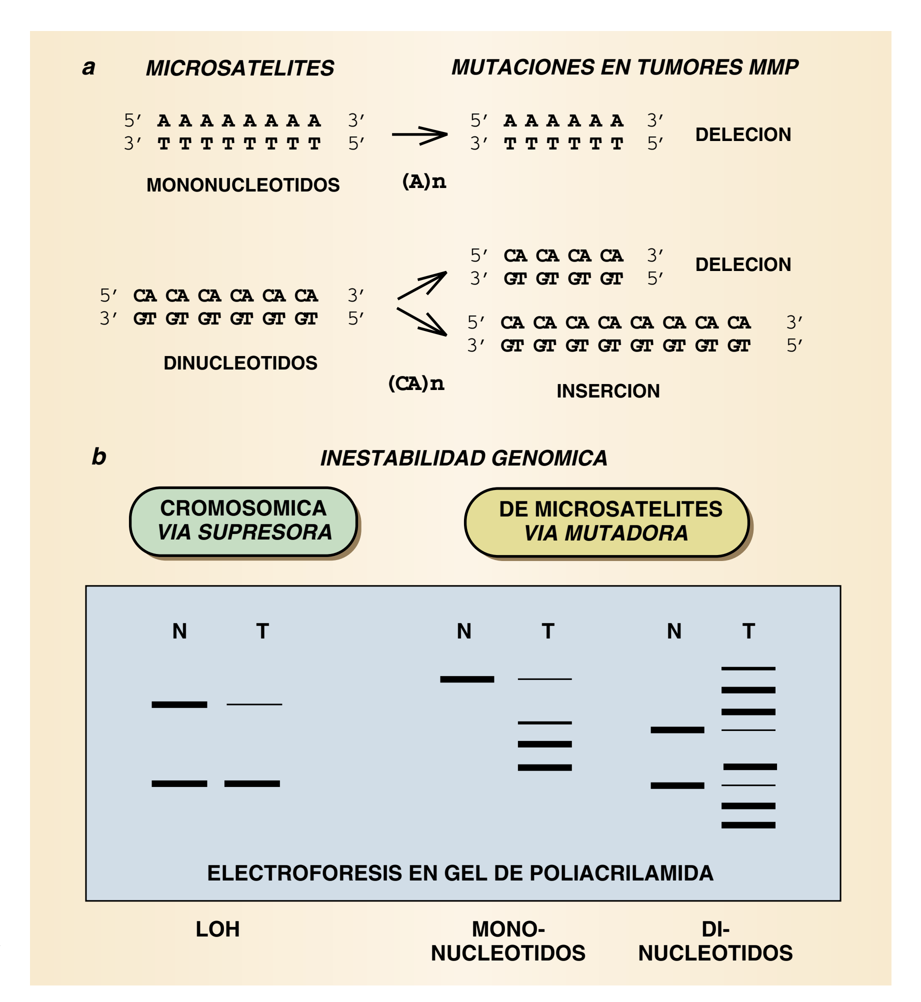
Cuando publicamos estas observaciones en 1993, se desconocía la existencia y la naturaleza de las mutaciones mutadoras. Nos limitamos entonces a sugerir que serían mutaciones que afectarían a genes implicados en la replicación o reparación del ADN.

Se tardó algún tiempo en desentrañar la naturaleza de las mutaciones mutadoras. Desde el principio supimos, sin embargo, cuál era el mecanismo en cuya virtud las mutaciones mutadoras producían las mutaciones en los microsatélites. Las secuencias mutadas presentaban una naturaleza repetida. Y el número de nucleótidos delecionados guardaba una estricta relación de dependencia con la longitud de la secuencia iterada.

Los experimentos con células en cultivo nos permitieron analizar la frecuencia de mutaciones *de novo* en clones constituidos a partir de una sola célula. La investigación abarcó diversas líneas celulares tumorales. Vimos que las inserciones o deleciones de una sola unidad de repetición, por ejemplo en microsatélites de mononucleótidos (A) o dinucleótidos (CA), eran mucho más frecuentes que las de dos unidades de repetición (AA o CACA), y éstas más frecuentes que las inserciones o deleciones de tres, y así sucesivamente.

Tales resultados confirmaban que las mutaciones se originaban por un fallo de corrección de los errores cometidos de forma espontánea durante la replicación de las secuencias repetidas. En concreto, se producía un alineamiento desigual al deslizarse una cadena sobre la complementaria. El fenómeno de deslizamiento ("slippage") de las cadenas de ADN había sido descubierto ya en 1966 por G. Streisinger y su grupo.

Streisinger describió, hace más de treinta años, un fenómeno fascinante durante sus estudios con el fago T4. Al preguntarse por qué las secuencias repetidas se mostraban muy propensas a sufrir mutaciones halló la razón en su carácter iterativo: el fácil desapareamiento de las bases al desenrollarse las cadenas del ADN durante el proceso de replicación. El desapareamiento de las dos cadenas



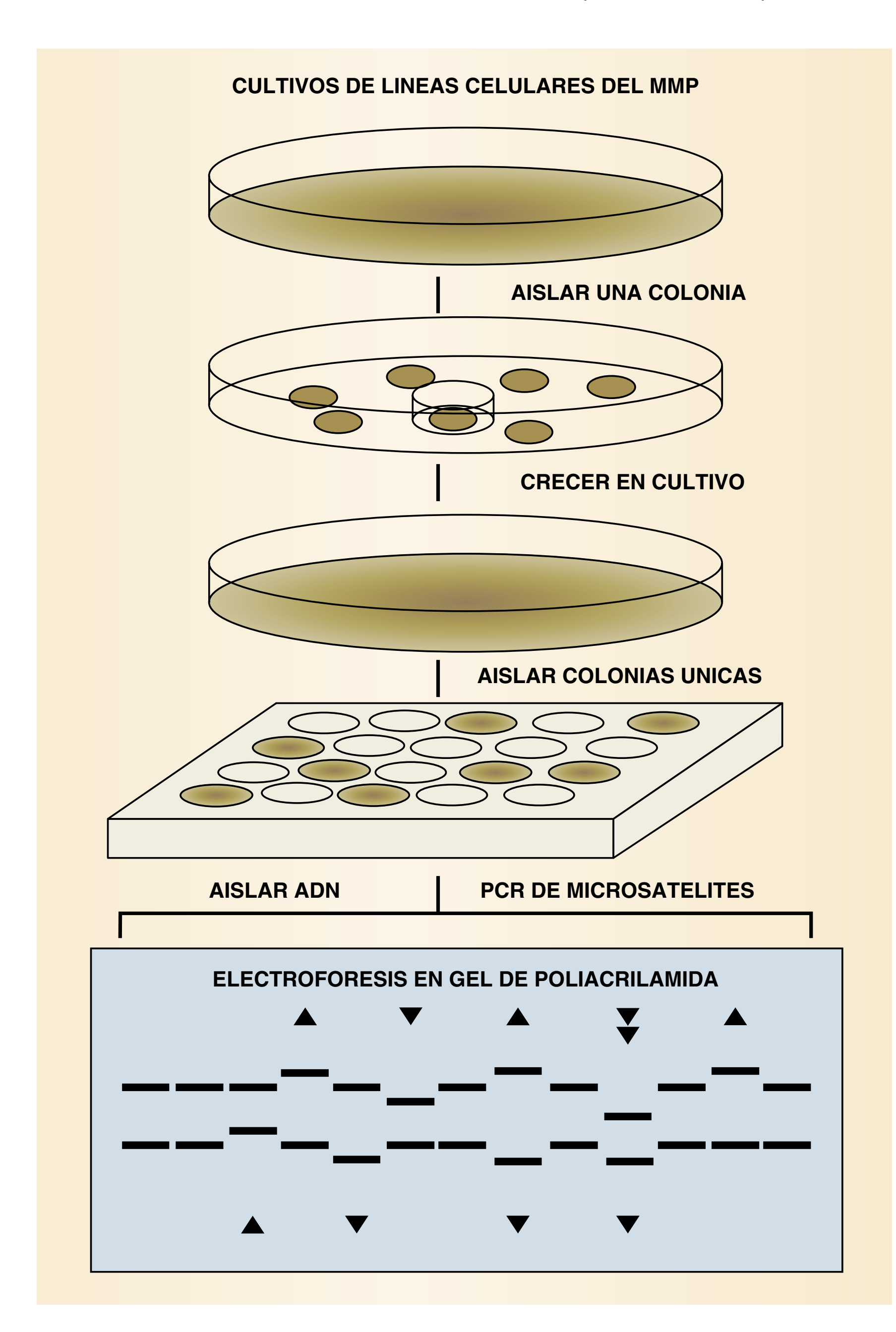
3. ALTERACIONES DE MICROSATELITES en cáncer colorrectal y su valor diagnóstico de las dos inestabilidades genómicas subyacentes. En la mitad superior del diagrama (*a*) se representa sólo un ejemplo de microsatélites de monodesoxiadenosina (A)n y dinucleótidos (CA)n. Microsatélites son también otras repeticiones de uno, dos, tres o cuatro nucleótidos, como (G)n, (CT)n, etcétera. Por mor de simplificación, se representan microsatélites de 8 y 6 unidades de repetición, pero el tamaño de los microsatélites genómicos suele ser superior. Las mutaciones en tumores se han tomado como ejemplos ilustrativos, aunque el número de unidades delecionadas o insertadas varía en cada tumor. En general, los microsatélites d(A)n sólo sufren deleciones, mientras que otros microsatélites sufren además inserciones. En la mitad inferior del diagrama (*b*) se ilustra la técnica que permite detectar la inestabilidad genómica. El análisis de microsatélites mediante electroforesis en geles de poliacrilamida sirve para diagnosticar los dos tipos de inestabilidad genómica en el cáncer de colon. La detección de cambios en la intensidad relativa de las bandas representa la pérdida de un alelo; revela la presencia de genes recesivos (pérdida de heterozigosidad o LOH) y descubre la inestabilidad cromosómica de la vía supresora. La detección de alteraciones en la longitud de los microsatélites (aparición de nuevas bandas en el ADN del tumor) indica inestabilidad somática, propia de la vía mutadora. En ambos tipos de inestabilidad, los fragmentos de ADN correspondientes a microsatélites presentes en el tejido normal (N) se dan también en el tejido tumoral, aunque son más débiles. Esto es debido a la presencia de tejido normal en los tumores.

generaba a menudo bucles de una unidad de repetición cuando la hebra tornaba a plegarse.

Podemos asimilar el fenómeno a lo que acontece con las cremalleras de las bolsas de viaje, que se cierran desde los dos extremos. Siempre queda algún diente suelto. Los bucles de nucleótidos se manifiestan en mutaciones, cuando se replican estas formas intermedias desapareadas. Los desapareamientos comportan inserciones, si el bucle se forma en la hebra molde, o deleciones si se forma en la hebra copiada, en una de las dos células descendientes.

Que el grupo de Streisinger descubriera y desentrañara ya en 1966 este mecanismo tan importante en la generación de mutaciones no deja de despertar admiración y asombro. La biología molecular no contaba ni con la PCR, ni siquiera con las enzimas de restricción y el ADN recombinante.

Pero el hecho de que las mutaciones ubicuas de microsatélites sigan el modelo de deslizamiento de Streisinger encierra un interés añadido. Mientras que el número de secuencias mutadas sobrepasa los cientos de miles en cada célula tumoral del MMP, el número de mutaciones sufridas por esas células tumorales es muy superior. Cada secuencia repetida mutada representa una serie de mutaciones sucesivas; en la mayoría de las veces, cada mutación determina la deleción o la inserción de sólo una unidad de repetición.



4. PERSISTENCIA DEL FENOTIPO MUTADOR de microsatélites en el cáncer colorrectal. El diagrama ilustra los experimentos *in vitro* que demostraron que las células tumorales del MMP continuaban acumulando mutaciones en los microsatélites. El análisis mediante geles de poliacrilamida de los microsatélites de clones de una sola célula permite estimar la frecuencia de mutaciones que ocurren durante un número determinado de replicaciones celulares, así como detectar la extensión de la mutación. Todas las mutaciones de la figura representan cambios de una sola unidad de repetición; las inserciones se simbolizan por triángulos hacia arriba y, hacia abajo las deleciones, a excepción de un solo clon que presenta deleción de dos unidades de repetición (dos triángulos).

La comparación de las características de los tumores del MMP con las características propias de los tumores sin mutaciones ubicuas en microsatélites reveló nuevas diferencias en el genotipo dignas de resaltar. Se vio, por ejemplo, una asociación negativa con mutaciones en el oncogén *K-ras* y en el gen supresor *p53*. Las alteraciones en microsatélites manifestaban, pues, la existencia de una vía molecular de oncogénesis distinta de la vía tomada por la mayoría de los cánceres de colon. Porque lo habitual en los cánceres de colon es acumular múltiples alteraciones en genes tumorales, de los que el oncogén *K-ras* y el gen supresor de la proteína p53 son los ejemplos paradigmáticos.

La vía mutadora es muy similar a la vía supresora. Aquélla sigue también el modelo de los dos episodios mutacionales propuesto hace más de veinte años por Alfred Knudson para el desarrollo del retinoblastoma. Para Knudson, el cáncer sólo se manifiesta cuando sufren mutaciones los dos alelos del mismo gen; esta hipótesis se ha generalizado con éxito a otros tipos de cánceres, entre ellos el colorrectal de la vía supresora.

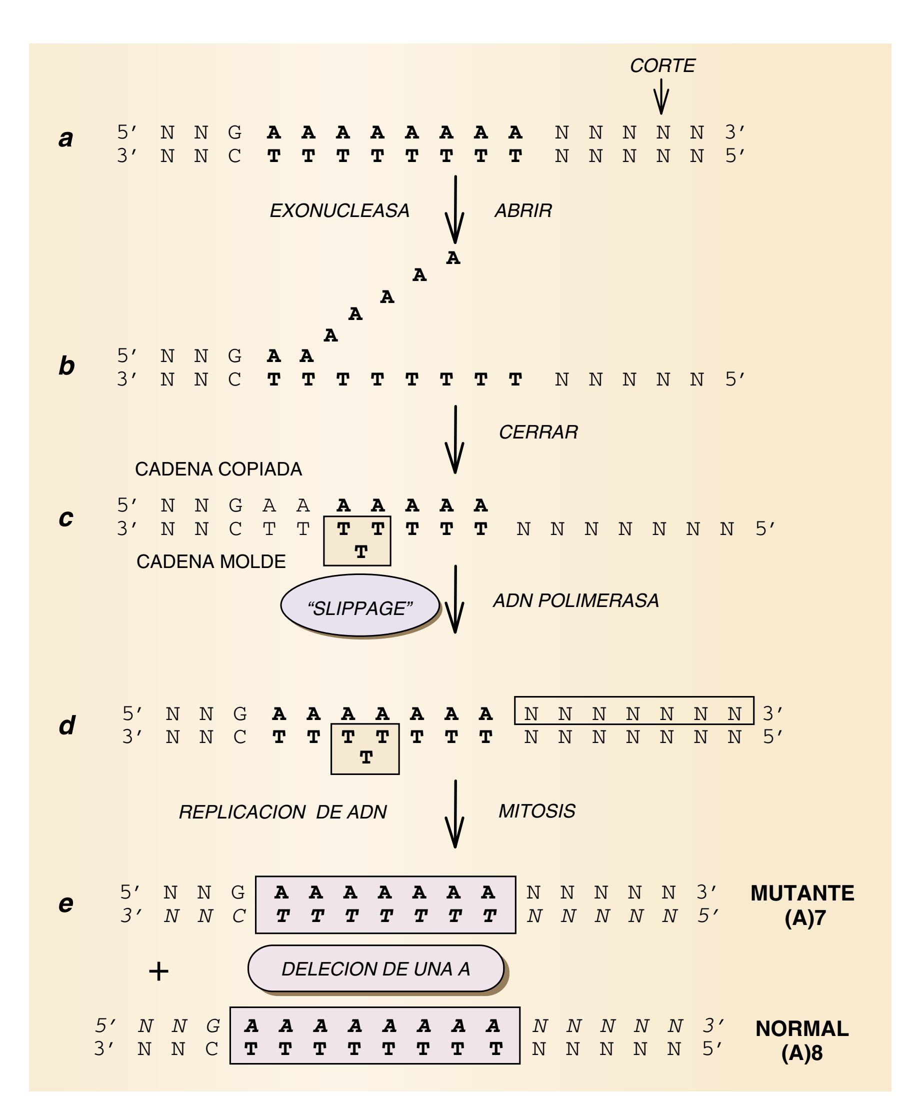
La vía mutadora para el cáncer colorrectal parece seguir también el modelo de Knudson. Lo comprobó en nuestro laboratorio Sofía Casares, que trabajó con híbridos de líneas celulares con y sin el MMP. Demostró en sus experimentos que el fenotipo mutador de microsatélites era recesivo; por tanto, las mutaciones mutadoras debían producirse en los dos alelos del mismo gen mutador.

Pese al paralelismo que se advierte entre las vías supresora y mutadora, la segunda vía difiere de aquélla en un aspecto fundamental: la mutación mutadora no altera las propiedades de crecimiento, ni de invasión territorial de la célula correspondiente relativa a las células colindantes en el epitelio colónico.

El modelo que Knudson postuló para el desarrollo del retinoblastoma se fundamentaba en el carácter hereditario de esta neoplasia infantil. En los casos hereditarios, la mutación en un alelo se transmite de generación en generación. Se trata, pues, de una mutación que portan todas las células del organismo. En los casos no hereditarios, las dos mutaciones sobrevienen, es decir, aparecen después de nacer y se dan sólo en algunas células.

La presencia en el mismo paciente de cuatro tumores de colon diferentes, todos con el MMP, resultó decisiva para percatarnos de que el fenotipo mutador de microsatélites tenía una predisposición hereditaria. Ya que sólo una minoría (10-15 %) de los tumores colorrectales pertenecen al fenotipo mutador de microsatélites, es difícil de explicar de otra manera la ocurrencia del MMP en todos y cada uno de los cuatro tumores del mismo individuo. La clara preponderancia de tumores en el colon proximal y la alta frecuencia de tumores de fenotipo pobremente diferenciado, no obstante su escasa capacidad de invasión, ofrecían pistas inconfundibles de que el MMP era la manifestación molecular del síndrome de cáncer hereditario de colon no ligado a poliposis (HNPCC).

Desde el descubrimiento del MMP se ha avanzado bastante en este campo. Se identificaron algunas mutaciones mutadoras; así, las que ocurren en miembros de la familia génica de reparación de los errores de apareamiento (“mismatches”). Los primeros genes mutadores que se aislaron fueron el *hMSH2* y el *hMLH1*, relacionados con los genes *Mut S* y *Mut L* de la bacteria *Escherichia coli*. La inestabilidad de microsatélites asociada a mutaciones en estos genes, o en otros genes mutadores todavía por identificar, se ha convertido ya en criterio diagnóstico de la mayoría de los tumores del síndrome de cáncer colorrectal hereditario (HNPCC) y de otros tumores del tracto gastrointestinal y urogenital, en particular el cáncer de estómago y de endometrio.

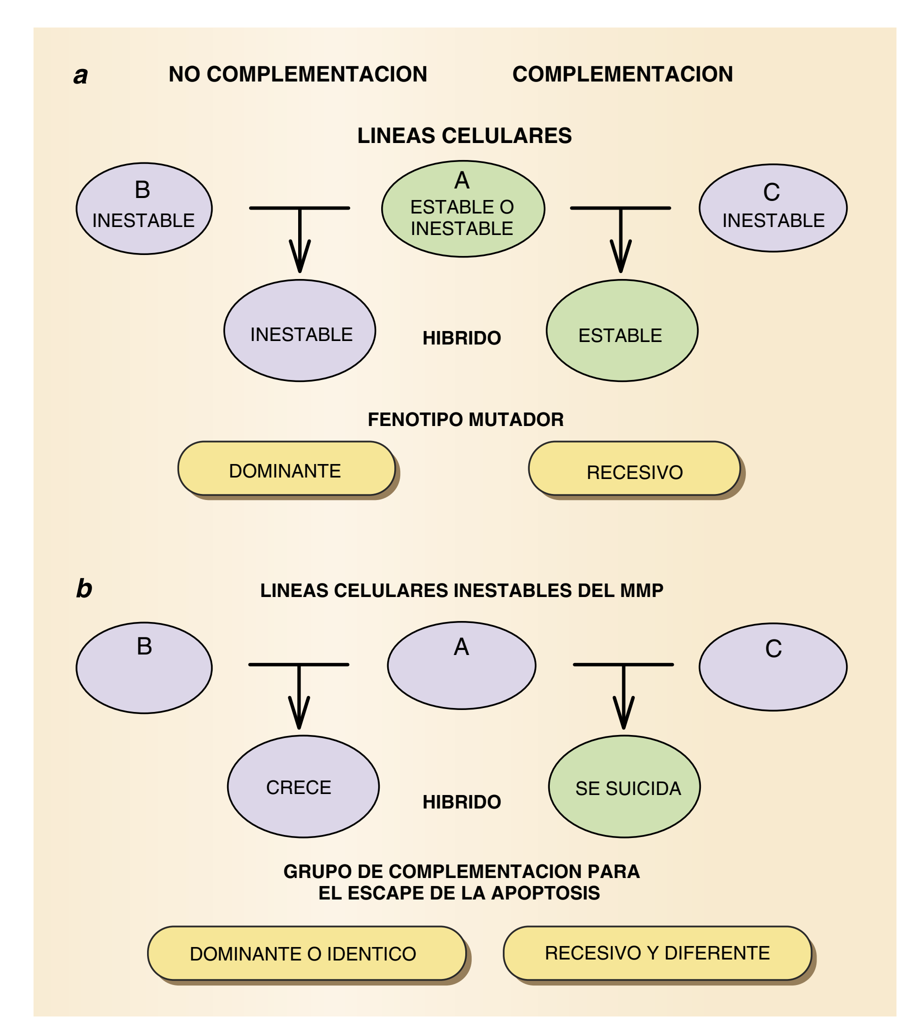


5. MODELO DE STREISINGER de mutaciones de inserción y deleción por errores espontáneos de apareamiento producidos por deslizamiento (“slippage”) durante la replicación del ADN. Se ilustra un ejemplo de generación de una deleción de un nucleótido en una serie de ocho (A), mediada por la formación de un bucle de un nucleótido en la cadena de ADN molde. En la cadena copiada se producen inserciones por un deslizamiento similar. Los nucleótidos en cursiva indican la cadena recién sintetizada en las células hijas, después de la mitosis.

El HNPCC es el síndrome de cáncer hereditario más común en la población. En los países desarrollados, el cáncer de colon representa la segunda causa de mortandad por neoplasia. El cáncer de estómago aparece también entre los de mayor incidencia mundial. Se prevé que a lo largo de este año aparezcan más de 100.000 nuevos casos de cáncer del fenotipo mutador de microsatélites en todo mundo.

Cuando propusimos el modelo de la vía mutadora para el cáncer, quedaba implícito que las mutaciones espontáneas de deslizamiento constituían episodios cruciales en la transformación neoplásica de los tumores del MMP. La hipótesis se basaba en el extraordinario número de mutaciones que acumulaban estos tumores. Con ese supuesto, predijimos que *cualquier* secuencia de ADN con repeticiones largas de polidesoxiadenosinas (A)n habría sufrido mutaciones de deleción.

Nuestra predicción se vio confirmada cuando encontramos en todos los tumores del MMP deleciones en cuantas secuencias portaban estos microsatélites. Pese a ello, los microsatélites no desempeñan ningún papel activo en el desarrollo del cáncer; por una razón obvia: se trata de secuencias sin poder codificante. Estas secuencias se originan en sucesos remotos de transposición o de duplicación que quedan fijados en



6. NATURALEZA RECESIVA DEL FENOTIPO MUTADOR y su conexión con la apoptosis. La generación de híbridos entre células permite determinar el carácter dominante o recesivo del fenotipo estudiado. En nuestro caso, la fusión entre células del fenotipo mutador de microsatélites y otras con o sin el MMP engendró híbridos estables. Por tanto, el MMP es un fenotipo recesivo. La fusión de varias combinaciones de células tumorales del MMP produjo híbridos abortivos, pues desarrollaban características apoptóticas.

el genoma a modo de reliquias de nuestro pasado evolutivo.

Con todo, hubo que esperar hasta hace poco para encontrar una prueba irrefutable de la relación de causa a efecto entre las mutaciones mutadoras del MMP y las mutaciones en genes tumorales, promotores del cáncer.

Los experimentos de fusión de líneas celulares establecieron el carácter recesivo del fenotipo mutador de microsatélites. En el curso de los mismos descubrimos por casualidad una conexión entre el MMP y la apoptosis, o muerte celular programada. Yurij Ionov observó que las células híbridas procedentes de distintas células tumorales del MMP no medraban, sino que cometían suicidio colectivo. Por separado, sin embargo, cada célula tumoral crecía sin problemas. Estos datos indujeron a pensar que las células del MMP pertenecían a grupos complementarios diferentes para evitar la apoptosis.

La apoptosis proporciona un mecanismo de protección contra el cáncer al desencadenar una serie de acontecimientos intracelulares que conducen al suicidio cuando la célula sufre un daño irreparable en su genoma. El gen *BAX* desempeña un papel central en los procesos de apoptosis. Mientras el nivel intracelular de la proteína BAX se mantiene en equilibrio con la de su antagonista, la proteína Bcl2, no se produce apoptosis. Ahora bien, en cuanto se rompe dicho equilibrio porque aumentan los niveles intracelulares de la proteína BAX, entonces la célula se suicida. Por tanto, las mutaciones inactivadoras del gen *BAX* terminan por evitar una apoptosis irremediable.

El rastreo sistemático de secuencias en GenBank, un banco de genes, reveló la existencia de secuencias repetidas de ocho desoxiguanosinas (G)8 en la región codificante del gen *BAX*. Descubrimos, gracias a los experimentos realizados por Hiroyuki Yamamoto, que había mutaciones de cambio de fase de lectura ("frameshifts") en el 50 % de los tumores de colon y en el 65 % de los tumores de estómago del MMP. Debíanse tales mutaciones a deleciones o inserciones de una base. Así fue como el gen BAX se sumó al número de genes tumorales conocidos; de ese modo también se puso de manifiesto la importancia que en la formación de tumores tenía el librarse de la apoptosis.

Los genes mutados específicamente en el cáncer del MMP, por ser dianas del fenotipo mutador, abarcan no sólo los responsables del crecimiento celular o la apoptosis, sino también los mismos genes mutadores. De acuerdo con las investigaciones de Sergei Malkhosyan y Hiroyuki Yamamoto, el fenotipo mutador de microsatélites se va manifestando poco a poco, en un proceso en el que se va ejecutando la inactivación sucesiva de genes mutadores. Esto se debe a la existencia en los genes mutadores *hMSH3* y *hMSH6* de secuencias repetidas en sus regiones codificantes. Ambos genes pertenecen también a la familia del gen *Mut S* de *E. coli*.

Alrededor del 50 % y 40 % de tumores gastrointestinales del MMP presentan deleciones e inserciones inactivantes, respectivamente. Dichas mutaciones se producen por alteración de la fase de lectura de aminoácidos ("frameshifts") en las secuencias repetidas de estos genes, ocho desoxiadenosinas en el gen *hMSH3* y ocho desoxiguanosinas en el *hMSH6*. Puesto que el MMP actúa sobre tales secuencias, inferimos que estas mutaciones se generan por un fenotipo mutador previo. Es decir, un mutador muta a otro mutador. A tenor de ese modelo, en que el "mutador muta a otro mutador", el MMP se desencadena en etapas sucesivas.

La inactivación permanente (o transitoria) de un mutador primario, como el *hMLH1* u otro equivalente, provocada por una mutación inactivadora o debilitante, genera un primer nivel

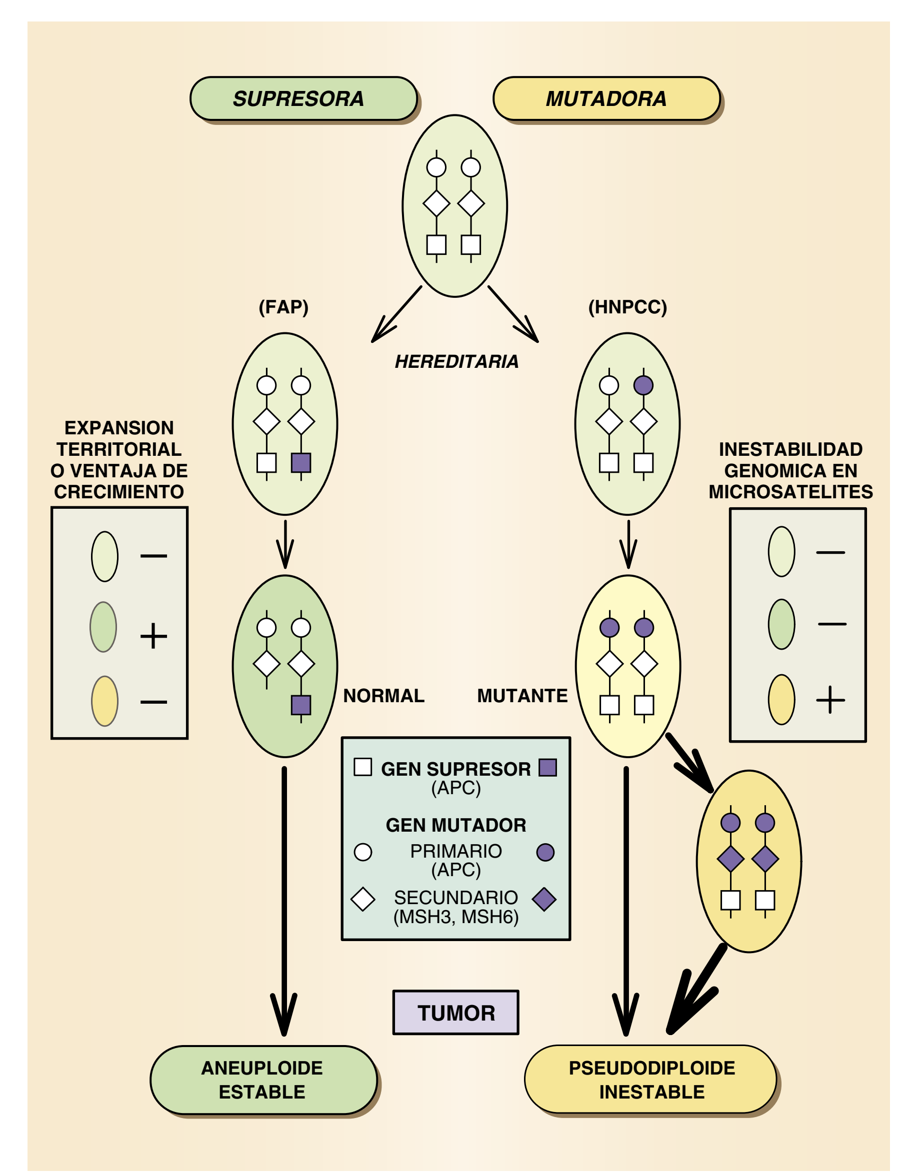
de inestabilidad. Este primer nivel de inestabilidad genómica conduce a mutaciones mutadoras secundarias en *hMSH3* y *hMSH6*. La inestabilidad genómica se incrementa por los mutadores secundarios, al aumentar la frecuencia de mutaciones del MMP o ensanchar la gama de las mismas. Se acelera así la acumulación de mutaciones en los genes tumorales que impulsan la tumorigénesis.

El modelo del mutador que muta al otro mutador admite múltiples variaciones sobre un mismo tema. Esa multiplicidad ilumina la complejidad del sistema. Se requiere un gran número de eventos mutacionales para destruir los mecanismos que controlan el crecimiento y supervivencia celulares, es decir, para que se produzca la transformation neoplásica. El modelo del mutador que muta al otro mutador reviste interés en el diagnóstico y el tratamiento del cáncer del fenotipo mutador de microsatélites. No es lo mismo luchar contra un solo enemigo que si hay varios (genes mutadores) a los que combatir.

El gen del receptor del factor transformante beta tipo II (*TGFβRII*) y el gen pro-apoptótico *BAX* fueron los primeros genes tumorales cuya mutación se atribuyó al MMP. Estas mutaciones brillan por su ausencia en los tumores de la vía supresora.

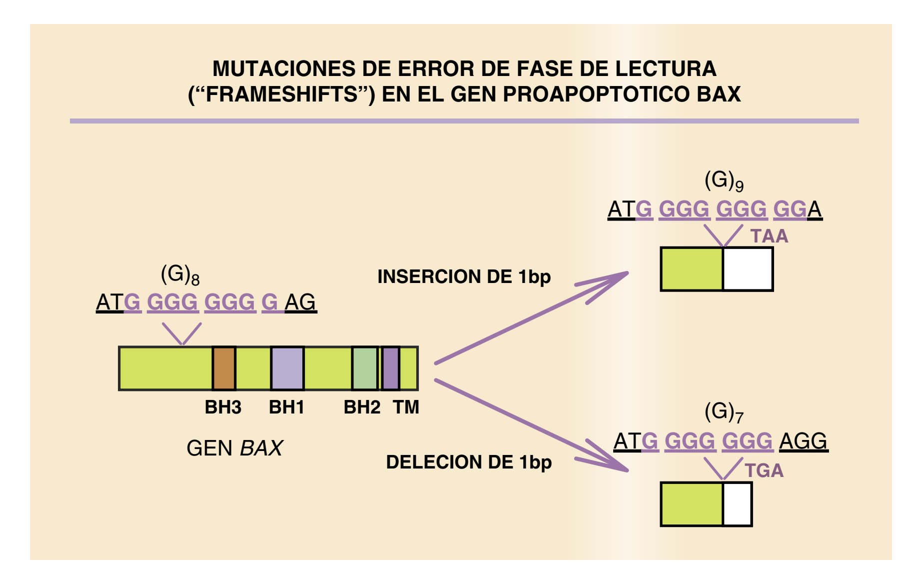
Las mutaciones experimentadas por los genes *TGFβRII* y *BAX* proporcionaron, pues, ejemplos convincentes de las diferencias genotípicas entre células tumorales de la vía supresora y células tumorales de la vía mutadora. Así, el cáncer gastrointestinal del MMP representa una vía molecular distinta para la oncogénesis (la vía mutadora) porque los genes tumorales mutados (oncogenes y genes supresores) difieren de los genes mutados en la vía supresora. Diferencias cuya raíz se encuentra en las secuencias repetidas de algunos genes tumorales, iteraciones que los exponen a mutaciones en presencia del MMP.

Los cánceres colorrectales muestran diferencias profundas, en genotipo y fenotipo, según manifiesten o no el MMP. Ahora bien, si nos ceñimos a los casos hereditarios y esporádicos del cáncer colorrectal del MMP, hemos de afirmar que no muestran entre sí diferencias genotípicas ni fenotípicas, salvo que el genotipo de los tumores hereditarios presenta ya una mutación en el gen mutador primario desde el nacimiento. En otro orden de cosas, hallamos aquí un ejemplo excelente para poner de manifiesto la relación de causa que existe entre el genotipo y el fenotipo. Si el fenotipo de los tumores —esporádicos o hereditarios— es idéntico, es decir, si se da una acumulación de millones de mutaciones en microsatélites, no hay ninguna razón para pensar que deban diferir sus genotipos.



7. VIAS MOLECULARES en la oncogénesis colorrectal. El modelo del doble episodio mutacional, propuesto por Alfred Knudson para el retinoblastoma, se ilustra en el caso particular del cáncer de colon de la vía supresora clásica. En este modelo, para iniciar el proceso que conduce al cáncer se requiere la mutación en los dos alelos del gen supresor. La vía mutadora sigue un proceso similar, mediante la inactivación mutacional de los dos alelos mutadores. Los genes aducidos son meros ejemplos ilustrativos de la complejidad del proceso neoplásico. A los genes *hMSH2* y *hMLH1* se les llama primarios y, secundarios, a los *hMSH3* y *hMSH6*, en razón de la ausencia y presencia de secuencias repetidas en sus regiones codificantes. El grosor de las flechas refleja el aumento gradual de la probabilidad de ocurrencia de otras mutaciones en los genes situados más abajo en la secuencia de la cadena oncogénica.

Las mutaciones en el gen *BAX* ayudan también a explicar la paradójica asociación negativa entre los tumores del fenotipo mutador de microsatélites y las mutaciones en el gen supresor *p53*. Resulta harto sorprendente que un tumor que acumula millones de mutaciones en microsatélites carezca de mutaciones en el gen supresor *p53*, conocido



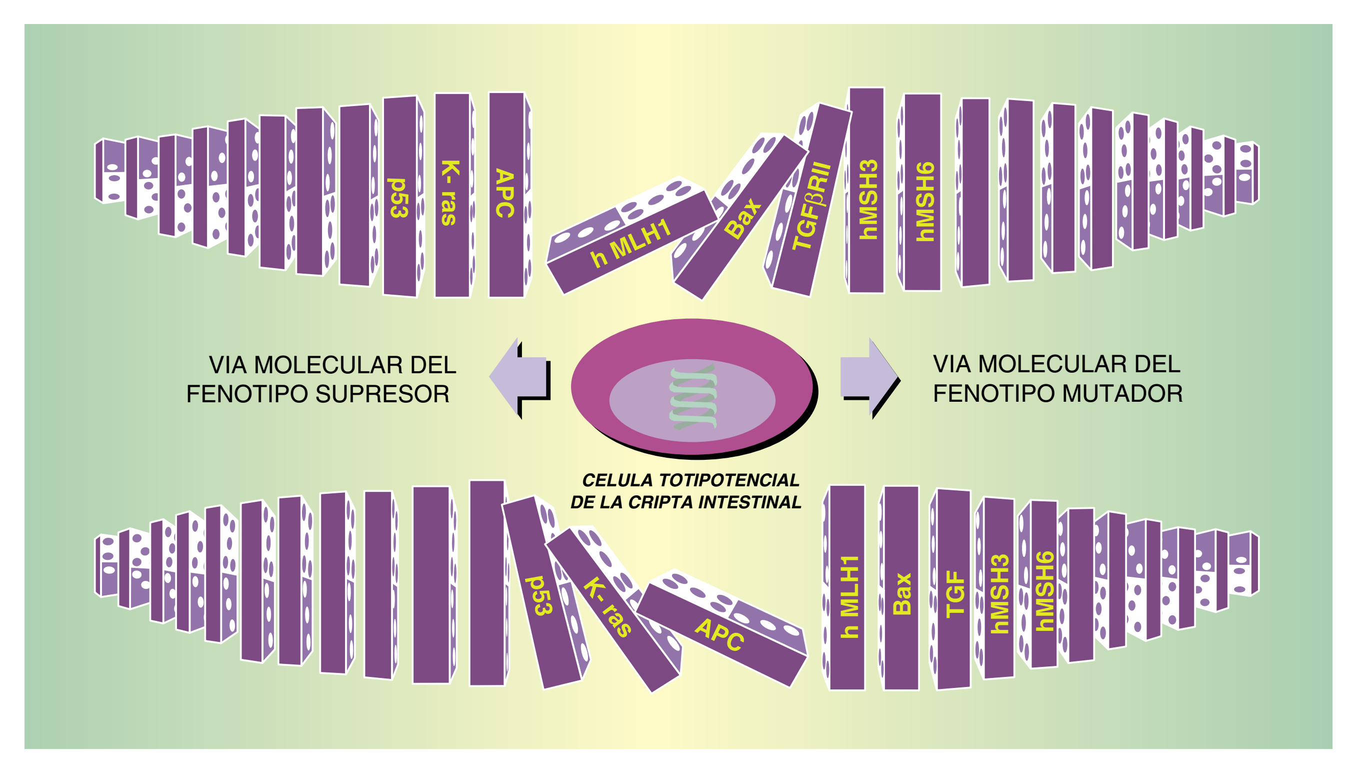
8. MUTACIONES DE ERROR de fase de lectura en el gen pro-apoptótico *BAX*. El diagrama representa la estructura primaria del gen *BAX*, con sus dominios de homodimerización; éstos son relevantes en la activación de su potencial pro-apoptótico, conducente al suicidio celular. La serie repetitiva de (G)8 presente en la mitad amino terminal de la proteína es una diana para mutaciones de deslizamiento en el MMP, que conducen a su inactivación por truncamiento de la proteína.

por ser el que con mayor frecuencia muta en el cáncer humano.

La proteína p53, un factor de transcripción, estimula la expresión de otros genes celulares. Entre los afectados destaca el *BAX*. Tras un daño irreparable del genoma, la proteína p53 estimula la transcripción del gen *BAX*, que inicia la apoptosis. Pero esa activación trascripcional pierde todo interés cuando en ese mismo gen se producen mutaciones de desplazamiento de fase. El incremento registrado en el nivel de expresión del ARN mensajero no se acompaña de un incremento en el nivel de proteína traducida, al hallarse ésta truncada por la mutación.

La presencia de secuencias repetidas en un grupo de genes tumorales, junto con los fallos producidos en los sistemas de reparación de mutaciones espontáneas de deslizamiento, parece así constituir la razón última de la existencia de las dos vías moleculares de oncogénesis.

Por su parte, la naturaleza del origen de las mutaciones en secuencias repetidas también resalta el carácter aleatorio, aunque a la postre inexorable, de los eventos que conducen al cáncer. Las mutaciones ocurren antes en el gen *BAX* que en el gen *p53*, porque éste no tiene en su región codificante secuencias repetidas tan largas como la del



9. VIAS ALTERNATIVAS de carcinogénesis gastrointestinal. El diagrama ilustra el carácter aleatorio, aunque direccional e inexorable a la vez, del proceso que conduce al cáncer gastrointestinal. En la vía mutadora, tras producirse la mutación mutadora en el gen *hMLH1*, la probabilidad de ocurrencia de mutaciones en los genes tumorales específicos de esta vía es mucho mayor que la probabilidad de ocurrencia de las mismas en los genes tumorales propios de la vía supresora. Tal discrepancia se debe a que los primeros (*BAX*, *TGFβRII*, *hMSH3* y *hMSH6*) contienen secuencias repetitivas, dianas del MMP, mientras que los segundos (*APC*, *p53*) carecen de ellas (*panel superior*). En ausencia del fenotipo mutador de microsatélites, las mutaciones resultan de la interacción entre el ADN y mutágenos externos, proceso en el que no se ven favorecidas las mutaciones en las mencionadas secuencias repetitivas (*panel inferior*).

BAX. Una vez el fenotipo mutador de microsatélites se manifiesta, los episodios que conducen al cáncer se suceden de acuerdo con las leyes de la probabilidad.

A modo de recapitulación, recordemos que en el cáncer de colon hay dos inestabilidades genómicas distintas. Una es la inestabilidad de microsatélites. El otro tipo, de inestabilidad cromosómica, se caracteriza por una alteración profunda del balance cromosómico. A cada tipo de inestabilidad corresponde una vía molecular diferente de patogénesis del cáncer de colon: por un lado, los tumores pseudodiploides con inestabilidad de microsatélites de la vía mutadora y, por otro, los tumores aneuploides de la vía supresora. Sabemos de la existencia de esas dos vías moleculares porque los tumores correspondientes manifiestan diferencias en su fenotipo. Por ejemplo, en sus manifestaciones clínicas, como el grado de invasión. Los tumores del fenotipo mutador de microsatélites son en general menos agresivos y tienen mejor pronóstico que los tumores de la vía supresora. Resaltemos aquí que a pesar de las diferencias moleculares, los tumores de las dos vías no se pueden distinguir por el análisis microscópico tradicional de histopatología.

Varios años después del descubrimiento de la vía mutadora y de las mutaciones mutadoras que la originan empezamos a conocer la relación causal entre genotipo y fenotipo, responsable última de las diferencias entre ambas vías moleculares. Que los tumores de una vía molecular difieran en su fenotipo de los tumores de la otra vía (más o menos agresividad y mejor o peor desenlace) se debe, en definitiva, a las diferencias en los genes tumorales involucrados. Por otra parte, que los tumores de una vía molecular presenten mutados una serie específica de genes tumorales se debe lisa y llanamente a la presencia o ausencia en la estructura primaria de los genes de estas mismas secuencias repetidas.

El camino que desemboca en el cáncer es sumamente intrincado, por la enorme complejidad del genoma humano y de los mecanismos de protección de la pérdida del control de la proliferación celular. Pero una vez que el MMP se manifiesta, tras la ocurrencia de las mutaciones mutadoras en las células precursoras normales del epitelio intestinal, los fenómenos que nos llevan a la neoplasia se suceden de una manera en cierta medida irremediable. Como en la mecánica cuántica, el proceso no se puede predecir en sus detalles individuales, pero sí en su comportamiento global. La sucesión de mutaciones oncogénicas se rige por las leyes de la probabilidad: por el azar, pero también por la necesidad.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

FRAMESHIFT MUTATIONS AND THE GENETIC CODE. G. Streisinger, Y. Okada, J. Emrich, J. Newton, A. Tsugita, E. Terzaghi Y M. Inouye, en *Quant. Biol.* vol. 31, págs. 77-84, Cold Spring Harbor Symp. 1966.

MUTATOR PHENOTYPE MAY BE REQUIRED FOR MULTISTAGE CARCINOGENESIS. L. A. Loeb en *Cancer Res.*, volumen 51, págs. 3075-3079, 1991.

ISOLATION AND CHARACTERIZATION OF ALLELIC LOSSES AND GAINS IN COLORRECTAL TUMORS BY ARBITRARILYPRIMED POLYMERASE CHAIN REACTION. M. A. Peinado, S. Malkhosyan, A. Velázquez y M. Perucho en *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*. vol. 89, págs. 10.065-10.069, 1992.

UBIQUITOUS SOMATIC MUTATIONS IN SIMPLE REPEATED SEQUENCES REVEAL A NEW MECHANISM FOR COLONIC CARCINOGENESIS. Y. Ionov, M. A. Peinado, S. Malkhosyan, D. Shibata, y M. Perucho, en *Nature*, volumen 363, págs. 558-561, 1993.

DEFECTS IN REPLICATION FIDELITY OF SIMPLE REPEATED SEQUENCES REVEAL A NEW MUTATOR MECHANISM FOR ONCOGENESIS. M. Perucho, M. A. Peinado, Y. Ionov, S. Casares, S. Malkhosyan y E. Stanbridge en *Quant. Biol*. vol. 59, págs. 339-348, Cold Spring Harbor Sympos., 1994.

HEREDITARY NONPOLYPOSIS COLORRECTAL CANCER (HNPCC): THE SYNDROME, THE GENES, AND HISTORICAL PERSPECTIVES. G. Marra y C. R. Boland en *J. Natl. Cancer Institute*, vol. 87, págs. 1114-1125, 1995.

CANCER OF THE MICROSATELLITE MUTATOR PHENOTYPE. M. Perucho, en *Biological Chem.* vol. 377, págs. 675-684, 1996.

SOMATIC FRAMESHIFT MUTATIONS IN THE BAX GENE IN COLON CANCERS OF THE MICROSATELLITE MUTATOR PHENOTYPE. N. Rampino, H. Yamamoto, Y. Ionov, Y. Li, H. Sawai, J. Reed y M. Perucho, en *Science*, vol. 275, págs. 967-969, 1997.

Técnicas inalámbricas

INFORME ESPECIAL

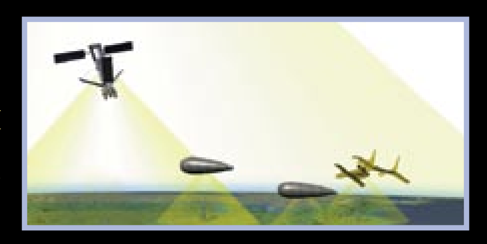


Nuevos satélites para comunicaciones personales

John V. Evans

Telecomunicaciones para el siglo XXI

Joseph N. Pelton



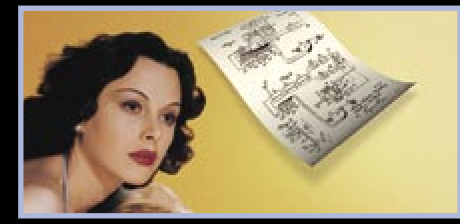


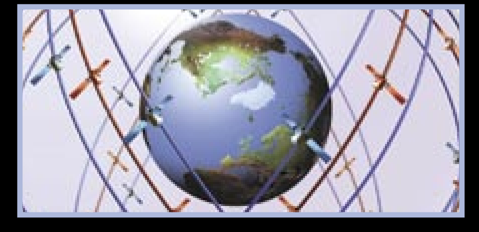
Redes inalámbricas terrestres

Alex Hills

Radio de espectro disperso

David R. Hughes y Dewayne Hendricks





Más allá de los sistemas de voz inalámbricos

Warren L. Stutzman y Carl B. Dietrich, Jr.

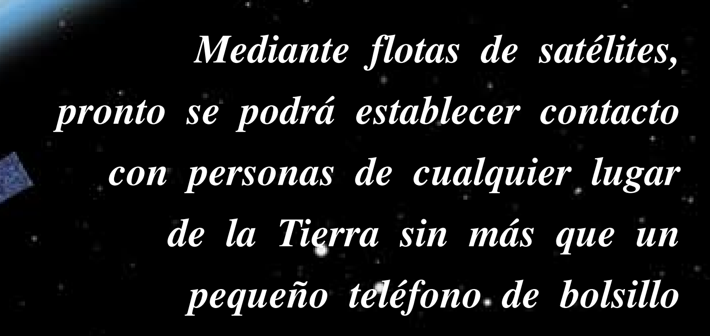
Guglielmo Marconi, inventor de la telegrafía sin hilos en 1896, no podría reconocer los sistemas inalámbricos actuales. Hace cuarenta años irrumpió la física del estado sólido con empuje revolucionario; mediante sucesivas reducciones de tamaño y mejoras de calidad, los aparatos de radio y los televisores se adueñaron de la estancia principal de millones de hogares. Hoy se puede guardar cualquiera de ellos en el bolsillo de la chaqueta y todavía queda sitio para un teléfono celular. Por todo el planeta se reciben continuamente señales de vídeo y de sonido encauzadas por satélites.

Pero el futuro nos reserva innovaciones aún más radicales. En este informe especial se describe la red celular mundial que una nueva generación de satélites y plataformas espaciales formarán; dicha red proporcionará primero comunicación vocal y luego enlaces de datos a alta velocidad a terminales portátiles ubicados en un lugar cualquiera. Unidas a los ordenadores de bolsillo y las redes instaladas en el suelo firme, estas técnicas nos darán acceso inmediato a una recopilación digital del saber acumulado por nuestra civilización. Nos sentiremos así más seguros y próximos a aquellos con quienes deseamos entrar en comunicación. El legado de Marconi es semilla de libertad.

—Los editores



Nuevos satélites para comunicaciones personales



Mediante flotas de satélites, pronto se podrá establecer contacto con personas de cualquier lugar de la Tierra sin más que un pequeño teléfono de bolsillo

John V. Evans

Desde que se puso en órbita el primer modelo comercial en el año 1965, el satélite de comunicaciones se ha convertido en pieza clave de las comunicaciones mundiales. Partiendo de comienzos modestos —aquel satélite sólo podía establecer 240 circuitos de voz al mismo tiempo— la técnica se ha desarrollado hasta el punto de que los satélites cursan hoy un tercio del tráfico telefónico vocal y esencialmente todas las transmisiones de televisión entre distintos países.

Pero una gran parte del tráfico de voz vehiculado por satélites se dirige a países que no tienen acceso a cables de fibra óptica, que son el medio preferido para el transporte de comunicaciones telefónicas. Los grandes satélites de comunicaciones se sitúan típicamente en órbitas geosíncronas, donde se mantienen constantemente a unos 36.000 kilómetros de altura sobre el mismo punto de la superficie terrestre (de ahí que también se llamen satélites geoestacionarios). A causa de ello las señales tardan un cuarto de segundo en recorrer en ambos sentidos la distancia entre satélite y Tierra, lo que retarda las respuestas recibidas durante la conversación. Aunque no a todos los usuarios les irrita ese retardo, los satélites de comunicaciones progresivamente se van dedicando al transporte de señales de televisión y de datos más que al tráfico de telefonía.

Todo esto podría estar a punto de cambiar. Quizá ya al final de este año comenzará a funcionar el primer sistema de comunicaciones por satélite de un tipo enteramente nuevo, que prestará esencialmente un servicio telefónico celular vía satélite. Entre otras características exclusivas, estos nuevos sistemas para comunicaciones personales estarán basados en un gran número de satélites situados en órbitas mucho más bajas que las geosíncronas; introducirán, pues, menos retardo en las conversaciones telefónicas. Habrá un segundo tipo de sistema diseñado principalmente para el tráfico de datos, como sucede en las conexiones a Internet. En los seis o siete años próximos podrían entrar en servicio de tres a cinco sistemas del tipo vocal y quizá más de una docena de sistemas orientados a datos (apoyados en flotas de satélites).

Es difícil, poco menos que imposible, predecir la rapidez y amplitud del crecimiento de este mercado. No obstante, varios grupos han invertido ya cientos de miles de millones de pesetas en proyectos que están en franco progreso. Los retos técnicos y también los riesgos son de envergadura; algunas de las empresas, por ejemplo, serían inimaginables si no fuera porque se dispone de una nueva generación de potentes satélites de comunicaciones capaces no sólo de amplificar y retransmitir señales, sino también de conmutarlas y encaminarlas. Por añadidura, varios de los sistemas propuestos trabajarán en ondas métricas (VHF), en bandas no utilizadas anteriormente para comunicaciones por satélite.

Telefonía de unos y ceros

Los nuevos sistemas de satélite combinan varios de los atributos de los sistemas telefónicos celulares con los de las redes tradicionales de comunicaciones por satélite. La telefonía celular habitual utiliza una banda de radiofrecuencias comprendida entre 800 y 900 megahertz. (Los nuevos servicios de comunicaciones personales, o PCS, operan a frecuencias que casi duplican las anteriores, pero ambos sistemas funcionan de la misma manera.) La zona a cubrir se divide en "células", cada una de las cuales contiene una estación de base y una torre radiante. Con el fin de mantener separadas las señales transmitidas y recibidas, los teléfonos celulares transmiten a su estación de base en una frecuencia y reciben de dicha estación en otra frecuencia distinta.

En la estación de base las señales de radio suelen convertirse a microondas, es decir, a un tipo de onda radioeléctrica de frecuencia superior, y retransmitirse a una central de conmutación telefónica celular en la que se restituyen las señales de voz. Esta última conversión puede también verificarse en la estación de base, transmitiendo las señales de voz a la central celular por líneas telefónicas ordinarias.

La central conmutadora se encarga tanto de establecer las llamadas como de transferirlas cuando el abonado pasa de una célula a otra en el transcurso de la llamada. Toda central celular está también conectada a una central de la red telefónica pública, pudiendo así comunicarse los abonados celulares con los usuarios de teléfonos corrientes.

1. LOS SATELITES DE COMUNICACIONES aquí ilustrados representan una nueva generación de naves capaces de conmutar y encaminar llamadas. Aparecen en la escena dos de los 66 satélites del sistema Iridium, situados en órbitas bajas, y en la realidad más separados de lo que indica este dibujo. Los paneles rectangulares inferiores son placas solares; los otros tres, en voladizo sobre los tres costados del vehículo espacial de 4,6 metros de longitud, son los paneles de antena principales.

JOHN V. EVANS estudió la carrera de físicas en la Universidad de Manchester. En 1960 se trasladó al Instituto de Tecnología de Massachusetts. En 1983 pasó a la compañía Comsat de Bethesda, de la que es vicepresidente y director técnico.

El número de abonados al servicio celular ha crecido tanto, que se están introduciendo técnicas digitales para mejorar las prestaciones de los sistemas. En las redes tradicionales, la voz del que habla se imprime sobre la onda radioeléctrica transmitida variando la frecuencia de la misma, técnica denominada modulación de frecuencia. El inconveniente de este método es que la señal transmitida ocupa enteramente una porción (canal) de 30 kilohertz dentro de la banda de radiofrecuencias utilizada. Con el fin de aumentar la capacidad se están modificando los sistemas para que las señales vocales se conviertan en el propio teléfono en un tren digital de bits que posteriormente se transmiten. Antes de transmitirlas, estas señales digitales se pueden "comprimir", con lo que se reduce el tiempo de ocupación del canal por cada comunicación a costa de una ligera pérdida de calidad de la señal.

También en la red telefónica pública tradicional se emplea la transmisión digital, pero a velocidades mucho más altas: 64 kilobits por segundo, frente a los 8 kilobits por segundo típicos de los sistemas celulares digitales. El muestreo digital a una velocidad tan elevada garantiza una buena calidad, pero requiere una anchura de banda todavía mayor que la necesaria para transmitir la propia señal analógica. ¿Por qué, entonces, preocuparse por conseguirlo? La respuesta es que proporciona un método fácil para combinar muchas llamadas telefónicas en un solo cable de fibra óptica o enlace de microondas, multiplexando los trenes de datos individuales en uno de mayor velocidad, que a su vez puede combinarse con otros formando trenes digitales de velocidades aún más elevadas. Por otra parte, las señales digitales facilitan la corrección de cualquier defecto originado en la red, dado que es posible restaurar cada bit en caso de que haya sufrido alteraciones, por ejemplo, en amplitud.

Las centrales de conmutación locales están conectadas (usualmente por cables de fibra óptica) a centrales "interurbanas" todavía mayores que dan curso a las llamadas de larga distancia. Las llamadas destinadas al extranjero se encaminan a centrales especiales de conmutación internacional, y a partir de éstas son transmitidas por cables de fibra óptica submarinos o a través de satélites.

No todos los países del mundo tienen conexión a cables submarinos de fibra óptica, pero en su mayoría están conectados a través de los satélites de la Organización Internacional de Telecomunicaciones por Satélite (Intelsat). Las llamadas que han de enviarse por satélite son encaminadas desde la central internacional a la estación terrena de Intelsat más próxima. (Intelsat es una de las organizaciones que operan satélites en las bandas de radiofrecuencias asignadas al llamado servicio fijo por satélite.) El tren digital de bits que representa esas llamadas se modula en una onda radioeléctrica que se amplifica y transmite hacia el satélite por una antena de reflector parabólico de hasta 15 metros de diámetro.

La radioseñal que llega al satélite es mucho más débil, debido a que su energía se dispersa en el espacio, haciendo caer su intensidad proporcionalmente al cuadrado de la distancia que ha recorrido. Si el satélite de comunicaciones está en órbita geosíncrona, necesitará otra antena de tamaño respetable (tal vez de dos a tres metros de ancho) para poder captar la señal, que seguidamente se amplifica y retransmite hacia la estación receptora en la Tierra. En dicha estación se invierten

Sistemas de comunicaciones personales por satélite orientados a voz

	IRIDIUM	GLOBALSTAR	ICO	ELLIPSO	ECCO
COMPAÑIA	Motorola	Loral/Qualcomm	ICO Global Communications	Mobile Communications Holdings	Constellation Communications
NUMERO DE SATELITES ACTIVOS	66	48	10	14	46
PLANOS ORBITALES	6 circulares polares (86,5°)	8 circulares inclinados (52°)	2 circulares inclinados (45°)	elípticos inclinados (116,6°); 1 elíptico ecuatorial (0°)	7 circulares inclinados (62°); 1 circular ecuatorial (0°)
ALTITUD DE LA ORBITA (KILOMETROS)	780 (LEO)	1414 (LEO)	10.355 (MEO)	520–7846 (MEO); 4223–7846 (MEO)	2000 (LEO)
SATELITES POR PLANO ORBITAL	11	6	5	4 por elíptica; 6 por ecuatorial	5 por inclinado; 11 por ecuatorial
HACES POR SATELITE	48	16	163	61	32 por inclinado; 24 por ecuatorial
COSTE COMUNICADO (MILES DE MILLONES DE PESETAS)	520,2	397,8	703,8	139,2	428,4

todos los procesos descritos para restituir las señales de voz individuales.

Cada uno de los satélites de Intelsat es capaz de transportar decenas de miles de circuitos de telefonía. Están accionados por energía solar, pero también almacenan combustible (típicamente hidrazina) para encender los cohetes impulsores que mantienen orientadas hacia la Tierra las antenas del satélite y, además, contrarrestan las atracciones gravitatorias del Sol y de la Luna.

Los satélites, estaciones de base

Los nuevos sistemas de comunicaciones personales por satélite se esfuerzan por incorporar en una sola red mundial las ventajas de los sistemas de satélite y los sistemas celulares. En estos nuevos sistemas los satélites serán, en realidad, estaciones de base en órbita, con las que comunicarán directamente los teléfonos móviles o portátiles. Además, igual que los sistemas de satélite tradicionales, las nuevas redes estarán capacitadas para atender extensas zonas, incluidas las que ahora carecen de todo tipo de servicio.

Sin embargo, tales ventajas sólo podrán sustanciarse mediante técnicas más depuradas. Uno de los retos fundamentales proviene del equipamiento forzoso del teléfono portátil con una antena pequeña. Y de que es imposible diseñar una antena de ese tipo que opere con alta directividad. Además, como los teléfonos se pegan al oído para utilizarse, la potencia de transmisión debe mantenerse por debajo de un watt aproximadamente para alejar toda preocupación por los posibles efectos de la radiación en radiofrecuencia sobre los tejidos cerebrales. (También se necesita trabajar a bajas potencias para evitar que las baterías se agoten demasiado pronto.)

Por todo ello la señal transmitida desde el teléfono es bastante débil: "oírla" en la órbita geoestacionaria requeriría una antena de 10 a 12 metros de diámetro. Desplegar en el espacio una antena tan enorme sería, en el mejor de los casos, muy difícil. Para obviar la necesidad de estos grandes reflectores los satélites del nuevo sistema de comunicaciones personales se colocarán en órbitas mucho más próximas a la Tierra. Dado que la potencia de señal requerida desciende con el cuadrado de la distancia, acercar la órbita desde 36.000 kilómetros hasta 10.000 kilómetros hace multiplicar por 13 la intensidad de la señal recibida del teléfono portátil. Este reforzamiento permite que la antena del satélite de órbita baja tenga un tamaño muy parecido —de dos a tres metros— a las que ahora se usan en los satélites geoestacionarios.

Se plantea, ciertamente, un compromiso. En la órbita geoestacionaria, cada satélite "ve" aproximadamente una cuarta parte de la superficie terrestre, con lo que bastan tres o cuatro satélites para obtener una cobertura global. A 10.000 kilómetros, por otra parte, el satélite tendría un período orbital de unas seis horas y contemplaría una parte más reducida de la Tierra. Para cubrir el planeta entero se necesitaría realmente una flota de al menos doce satélites separados a intervalos regulares.

Además, como la señal emitida por el teléfono portátil es débil, se encomienda íntegramente al satélite la tarea de completar el enlace de comunicación. La conexión sólo puede lograrse si el satélite emplea haces puntuales muy estrechos, del orden de un grado, cada uno de los cuales cubra una "célula" de unos 150 kilómetros de amplitud en la superficie. Para conseguir la cobertura de la zona de servicio deseada debe emplearse un gran número de estos haces.

En general, los satélites deben colocarse en órbitas situadas por encima o por debajo del cinturón de radiación de Van Allen, cuyas partículas energéticas ionizadas podrían dañar las células solares y

LEO	ORBITA TERRESTRE BAJA (A MENOS DE 2000 KM)
MEO	ORBITRA TERRESTRE MEDIA (APROX. 10.000 KM)
GEO	ORBITA TERRESTRE GEOSINCRONA (36.000 KM)

Sistemas de comunicaciones personales por satélite orientados a datos

	ASTROLINK	CELESTRI	CYBERSTAR	SPACEWAY	GE*STAR	MORNINGSTAR	TELEDESIC
COMPAÑIA	Lockheed Martin	Motorola	Loral	Hughes	G.E. Americom	Morning Star	Teledesic
NUMERO DE SATELITES ACTIVOS	9	63 LEO/9 GEO	3	20 MEO/16 GEO	9	4	288
PLANOS ORBITALES	Ecuatorial (0°)	7 inclinados (48°); 1 ecuatorial (0°)	Ecuatorial (0°)	4 inclinados (55°); 1 ecuatorial (0°)	Ecuatorial (0°)	Ecuatorial (0°)	12 inclinados (98°)
ALTITUD DE LA ORBITA (KILOMETROS)	GEO	1400 (LEO) y GEO	GEO	10.352 (MEO) y GEO	GEO	GEO	1375 (LEO)
CAPACIDAD ESTIMADA DEL SATELITE (GIGABIT POR SEGUNDO)	6,0	1,5	9,0	4,4	4,7	0,5	10,0
INVERSION DE CAPITAL ESTIMADA (MILES DE MILLONES DE PESETAS)	612,0	1973,7	244,8	979,2	612,0	125,5	1377,0

quizás otros componentes de estado sólido. Por eso los satélites deben estar a unos 10.000 kilómetros de altura (por encima) o a unos 1500 kilómetros (por debajo). En la última opción, sin embargo, el período orbital es aproximadamente de 100 minutos, y para cubrir todo el globo se necesitan 50 o más satélites, puesto que cada uno sólo ve una pequeña parte del mismo. (Puede compararse con fotografiar un elefante desde un metro de distancia.) Las alternativas de órbitas alta y baja son conocidas como órbita circular intermedia (ICO) y órbita terrestre baja (LEO).

Compromisos de los satélites

Una ventaja de los sistemas de comunicaciones personales por satélite será la de tener un camino en gran medida libre de obstáculos entre el satélite y los abonados, lo que permitirá funcionar a niveles de potencia más bajos. En los sistemas celulares terrestres, sin embargo, la torre radiante no suele estar a la vista y los enlaces de comunicación requieren mayor potencia. Puesto que las comunicaciones entre satélites y abonados móviles no operan con enlaces tan potentes, se resentirán de los fallos de señal causados por edificios, árboles u otra clase de obstrucciones. Según se ha demostrado, los sistemas que operan con satélites más altos, en la órbita circular intermedia, resultan favorecidos, toda vez que los satélites son generalmente visibles a elevaciones superiores y atraviesan el firmamento con más lentitud.

Las altitudes superiores también implican que se necesiten menos satélites para cubrir todo el globo. De nuevo, no obstante, se plantea un compromiso: la exigencia de antenas más grandes en el satélite y de que cada antena forme un mayor número de haces puntuales con el fin de mantener la cobertura global. Por tanto, los satélites de órbita baja tienden a ser más pequeños, más ligeros y menos costosos que las naves espaciales de órbita circular intermedia, los cuales a su vez costarán menos que los satélites geosíncronos.

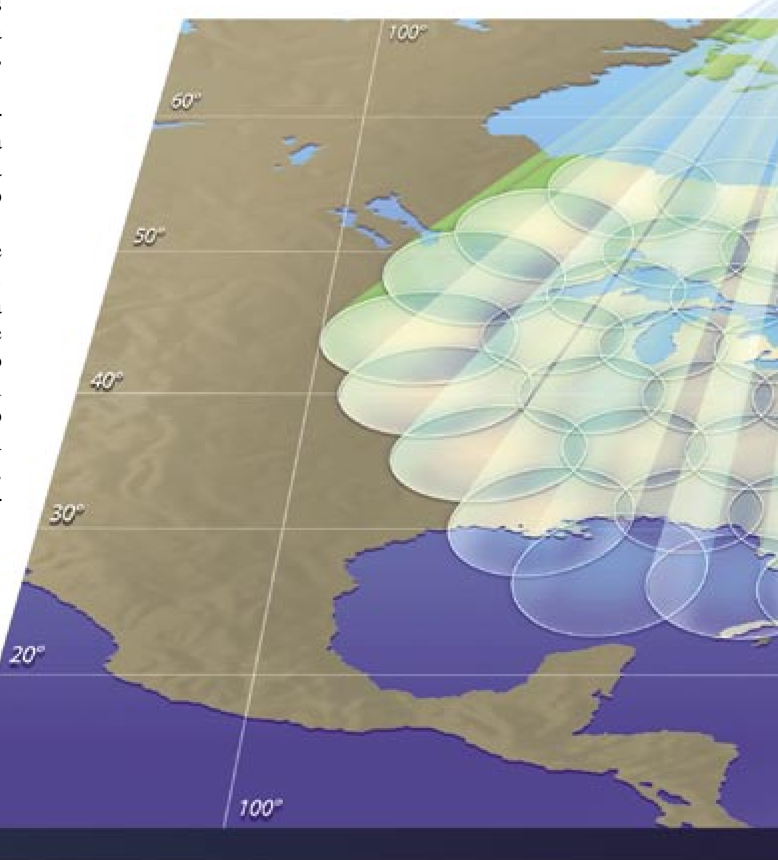
Otro reto para los ingenieros de sistemas de comunicaciones personales por satélite es la obligada transferencia cuando el abonado pasa de la cobertura de un haz puntual a la de otro haz. Sucede lo mismo que en un sistema celular terrestre, pero a la inversa: aquí el abonado está fijo y son las células las que se van desplazando con arreglo al movimiento del satélite. Por supuesto, el abonado que ha logrado establecer una llamada se encuentra en un haz conocido, y se puede gestionar con relativa facilidad su transferencia de uno a otro haz. Más complicada es la transferencia de un satélite a otro, que probablemente se producirá cuando los satélites son de órbita baja. El grado de dificultad depende de las particularidades del sistema de satélite; en el caso más favorable, no debe efectuarse la transferencia hasta que la señal del abonado no se reciba en el satélite siguiente.

Todos los sistemas aquí descritos requieren algún tipo de control de la red. Habitualmente se necesita disponer de un canal de señalización, a través del cual se transmite inicialmente la petición de llamada originada en el teléfono. Pero, al igual que en los sistemas celulares terrestres, la llamada se cursa siempre por un canal distinto del canal de señalización, con lo que el canal de señalización queda disponible para otras llamadas. Las señales que recibe el satélite deben retransmitirse a una "estación terrena de cabecera" que va siguiendo la trayectoria del satélite. En esa estación se reconvierten a señales telefónicas ordinarias y pasan a la red pública conmutada.

Los viajes comerciales en el punto de mira

Los sistemas telefónicos celulares de cobertura mundial difieren entre sí considerablemente según el tipo de clientes a quienes se desee atraer. Abundarán los usuarios potenciales entre los que han de viajar por motivos comerciales, y éstos serán de dos tipos: unos van desde el mundo desarrollado a países menos adelantados donde el servicio telefónico local tal vez sea poco seguro, mientras que otros necesitan comunicaciones móviles en su propio país cuando salen fuera de la cobertura de los sistemas celulares terrestres. Otros posibles usuarios serían los habitantes de zonas muy aisladas, que carecen en absoluto de servicio, además de los agentes del orden, bomberos, protección civil y otros empleados públicos que necesiten acceso a una red de comunicaciones capaz de sobrevivir a desastres naturales como terremotos o inundaciones.

Se han propuesto multitud de sistemas, pero sólo cinco de ellos parecen ofrecer ciertas expectativas de realizarse. Cuatro son de origen estadounidense y han obtenido licencia de la Comisión Federal de Comunicaciones (FCC); el quinto se ha concebido en la Organización Internacional de Telecomunicaciones Móviles por Satélites (Inmarsat), que como Intelsat se funda en un tratado. Los cuatro proyectos de EE.UU. son: Iridium, cuya construcción realiza Motorola en unión de Lockheed Martin, Raytheon y otros contratistas; Globalstar, en el que Loral Space and Communications (fabricante de satélites) y Qualcomm (productor de equipo celular) son



los principales participantes; ECCO, propuesta original de Constellation Communications, Inc. (CCI) en Reston, y Ellipso, que será construido por Mobile Telecommunications Holdings, Inc. en Washington, D.C.

Con un coste presupuestado de más de 500.000 millones de pesetas, Iridium es el proyecto de mayor complejidad técnica y también el que se terminará primero. Su configuración requiere 66 satélites, cada uno de ellos capaz de atender 1100 comunicaciones simultáneas y provisto de combustible suficiente para ocho años de vida. Hasta este momento, Motorola ha lanzado dos tercios de los satélites y proyecta ponerlos en servicio en el cuarto trimestre de 1998. Se están colocando en órbitas circulares bajas, sobre los polos, a 780 kilómetros de altitud, en seis planos orbitales separados a igual distancia.

Los servicios a prestar incluyen la telefonía vocal, la transmisión de datos a 2,4 kilobits por segundo y la radiobúsqueda. La conexión vocal por Iridium es más estable que la de los demás sistemas de comunicaciones personales por satélite en proyecto, pues Motorola exigió que el teléfono móvil pudiera utilizarse desde el interior de un vehículo (un taxi, por ejemplo). A ello le obligaba el objetivo primario de atender a los viajes internacionales de tipo comercial.

La complejidad del sistema Iridium proviene en gran parte de que los satélites están diseñados para comunicarse no sólo con las estaciones terrestres, sino también entre sí. Para encauzar el tráfico, cada satélite debe almacenar un conjunto de tablas de las cuales se van eligiendo, a intervalos de minutos, nuevas instrucciones para el encaminamiento de las llamadas. Las señales procedentes de la superficie terrestre se transmiten en ráfagas o "paquetes", cada uno de los cuales incluye la dirección del destino deseado. Las señales se demodulan en el satélite de modo que pueda leerse su dirección y retransmitirse los paquetes a su siguiente destino.

Ese destino puede ser una unidad de abonado móvil de Iridium, o bien una estación terrestre de cabecera. Si no está a la vista ni el uno ni la otra, entonces será uno de los cuatro satélites más próximos: el que le precede o el que le sigue en el mismo plano orbital, o el que esté más cercano en el plano orbital adyacente por el este o por el oeste. Aun a costa de complicar el diseño del sistema, estas interconexiones permitirán ofrecer un servicio mundial con una docena de estaciones de cabecera solamente.

El control de la red en el sistema Iridium es particularmente delicado porque la mayor parte de la red reside en los satélites y sus enlaces de interconexión. Para evitar la congestión, estos enlaces se han proyectado de manera que cada uno pueda cursar todo el tráfico procedente de un determinado satélite. Previendo el fallo de una interconexión, el satélite lleva a bordo instrucciones de encaminamiento alternativo.

El sistema Globalstar va a apoyarse, como el Iridium, en satélites de órbita terrestre baja. Pero, a diferencia del Iridium, los satélites no estarán interconectados. Si bien esta solución simplifica enormemente el diseño general, también implica que un abonado sólo podrá acceder al sistema cuando tanto dicho abonado como una estación terrestre de cabecera caigan dentro de la zona de cobertura de un mismo satélite. Por esta razón, las zonas de servicio se limitarán a unos 1600 kilómetros en torno de cada estación de cabecera. Conseguir una cobertura mundial exigiría construir más de 200 estaciones terrestres, lo que resulta excesivo. En consecuencia, Globalstar pretende cubrir ante todo los viajes de carácter comercial por un solo país, no los viajes internacionales.

La mayoría de los componentes de los satélites han sido ya construidos por Loral, y Qualcomm ha desarrollado gran parte del segmento terreno. Globalstar espera tener en servicio su sistema a principios de 1999. Los satélites se están ensamblando actualmente en Alenia Spazio, Italia, y en febrero se han lanzado los cuatro primeros. El plan prevé, una vez lanzado el segmento espacial, conceder franquicia de utilización a socios de diferentes países: se han establecido ya más de 100 relaciones de este tipo. Además de la telefonía vocal, Globalstar ofrecerá facsímil, datos y otros servicios.

El sistema Globalstar comprenderá 48 satélites, dispuestos en ocho planos de seis satélites cada uno. Las órbitas de los satélites serán circulares, a 1414 kilómetros de altitud y una inclinación de 52 grados con respecto al ecuador. La inclinación de las órbitas concentra la capacidad de satélites disponible en latitudes más bajas, que son las más pobladas; por encima de los 70 grados de latitud en ambos hemisferios la cobertura es prácticamente nula.

Otro de los sistemas de órbita baja en proyecto es ECCO, que utilizará 46 satélites: 11 en una órbita

2. CADA HAZ PUNTUAL de un satélite Iridium cubre en la superficie terrestre una "célula" de 150 kilómetros de anchura. Un grupo de cuatro docenas de estos haces relativamente estrechos da cobertura a una región más extensa, por ejemplo, la parte oriental de EE.UU. Es preciso utilizar haces estrechos porque las señales emitidas por los teléfonos móviles son débiles, debiendo el satélite asumir las principales tareas de la conexión.

ecuatorial circular a 2000 kilómetros de altura y cinco por órbita en otras siete órbitas inclinadas. La finalidad del sistema es ofrecer telefonía rural y servicio de facsímil, ambos a 2,4 kilobits por segundo. CCI propone que los satélites sean construidos por Matra Marconi Space, consorcio formado por el grupo francés Lagardère y el británico GEC.

Orbitas más elevadas

Los dos sistemas de comunicaciones personales cuyos satélites orbitarán a mayor altitud que los de órbitas bajas son ICO, realizado por ICO Global Communications, y Ellipso. Este último sistema es el único que utiliza satélites en órbita elíptica, buscando aprovecharse de que la mayor parte de la población mundial se concentra en el hemisferio norte. Se elige, pues, una órbita cuyo punto más alejado de la Tierra (el apogeo) se sitúe sobre el hemisferio norte, con lo que el satélite pasará más tiempo al norte del ecuador. El constructor, MCHI, proyecta encargar los satélites a Orbital Sciences Corporation en Dulles, Virginia.

Ellipso se propone ofrecer una solución económica, estimando en unos 140.000 millones de pesetas su coste total. Los satélites serán parecidos a los de Globalstar, con 61 haces puntuales y sencillos transpondedores del tipo "repetidor" que se limitan a retransmitir en diferentes frecuencias las señales recibidas. Cada satélite deberá pesar unos 700 kilogramos y su vida útil variará entre cinco y siete años.

El sistema ICO es el único de este grupo que utilizará órbitas circulares intermedias. Inmarsat, autora del diseño, posee un 15 por ciento de la empresa, en la que también participa Hughes, cuya División de Espacio y Comunicaciones está fabricando el vehículo espacial. El segmento terrestre lo construye un equipo formado por NEC, Ericsson y la División de Sistemas de Red de Hughes. ICO espera tener el sistema en servicio para el 2000.

Con el fin de dar la mayor efectividad posible al enlace entre teléfono y satélite, el diseño de ICO utiliza 163 haces puntuales, número realmente elevado, por cada satélite. Esta multitud de haces se consigue mediante una matriz de elementos radiantes. Las señales entregadas a estos elementos se tratan en un procesador digital de suerte que varias de ellas puedan contribuir a formar uno de los 163 haces. Se requiere también un proceso digital para dirigir al haz puntual apropiado las señales que llegan desde la estación terrestre de cabecera. Este procesador digital consumirá una gran cantidad de potencia del satélite —del orden de dos kilowatt— y será el más complicado que jamás se haya instalado en una nave espacial.

Sin duda es difícil predecir cuántos de estos sistemas —y cuáles en concreto— van a lograr el éxito. No obstante, ciertos aspectos son dignos de destacar. La elevada potencia de procesamiento que requieren los satélites de Iridium y de ICO comporta un evidente riesgo técnico. Hasta la fecha, solamente se han puesto en órbita tres satélites con procesadores digitales de importancia: uno era el satélite técnico de comunicaciones avanzadas de la NASA y los otros dos eran naves experimentales italianas. Por añadidura, el proyecto Iridium parece depender en alto grado de algo así como un millón de viajeros internacionales de negocios, cuyas necesidades podrían verse atendidas de otras maneras; por ejemplo, con teléfonos celulares preparados para funcionar según diferentes normas a medida que se recorre el mundo.

Entre los sistemas de cobertura mundial, Globalstar parece ofrecer buenas perspectivas para los negocios, ya que su segmento espacial no resulta oneroso y el coste del segmento terrestre lo comparten los operadores franquiciados del sistema. Además, es probable que estos operadores consigan abreviar los trámites reglamentarios susceptibles de retrasar o entorpecer el acceso a su mercado local. En cuanto a los sistemas restantes, pese a ser menos complejos que Iridium, pueden verse perjudicados por no salir al mercado sino varios años después de sus competidores más avanzados. Quizá también sea difícil que Ellipso y ECCO obtengan la financiación adecuada, dada la posición preeminente de los Iridium, Globalstar e ICO.

Todo esto se complica al considerar cuál podría ser la actitud de los posibles abonados. Acostumbrados a la calidad y a la gran penetración de los sistemas celulares, algunos quizá renuncien del todo a utilizar teléfonos de satélite, cuyos enlaces de comunicación son algo más débiles. Por otra parte, tal vez haya muchos abonados que decidan adquirir un teléfono de satélite (o celular/satélite) como medida de seguridad —por ejemplo, ante una avería del vehículo en zonas desiertas y remotas—, pero que lo utilicen muy raramente.

Servicios de datos de comunicación plural

La liberalización de la industria de telecomunicaciones está acelerando la aparición de nuevos servicios e incitando a invertir enormes sumas en nuevas instalaciones. Factor esencial de esta actividad es la imparable penetración de Internet, que podría pasar de los 50 millones de familias actuales a unos 150 millones para el año 2000, representando un mercado de más de billón y medio de pesetas. El uso empresarial de Internet puede crecer aún con más vigor, y las compañías se valen cada vez más de Internet para crear sus propias "intrarredes" semiprivadas. Los observadores creen que este mercado podría expandirse desde menos de 150.000 millones de pesetas gastados en 1996 hasta más de 4,5 billones para el año 2000.

Para atender estos mercados hay numerosos sistemas de satélite en proyecto. Dada la congestión que sufren las frecuencias actualmente utilizadas para los servicios fijos (distintos de los móviles) por satélite, los nuevos sistemas funcionarán en una gama de frecuencias más altas, conocida como banda Ka. La elección de

3. NUEVE SATELITES GEOSINCRONOS en cinco posiciones orbitales forman la constelación del sistema Astrolink, uno de los siete sistemas de satélite propuestos para prestar comunicaciones de datos, sobre todo para servicio de Internet. Seis de los siete sistemas utilizarán satélites geosíncronos, a los que se puede acceder con terminales más sencillos y económicos, pues no se requiere seguimiento de los satélites. Ese ahorro podría ser una ventaja notable en el mercado de consumo.

esta banda viene en gran medida impuesta por la ausencia de una opción alternativa adecuada; los desarrollos recientes hacen casi imposible asegurar posiciones orbitales para satélites que operasen en otras bandas sin interferir a los satélites cercanos. Se estima que hay más de 50 proyectos propuestos para la banda Ka, los cuales requieren unas 170 posiciones de la órbita geoestacionaria. En su mayoría estas propuestas se destinan a sistemas nacionales o regionales.

El principal problema de la banda Ka, que abarca longitudes de onda desde uno a 1,5 centímetros, es que las señales sufren una notable atenuación por la lluvia. Por tal motivo, el empleo de la banda Ka se había hasta hace poco confinado a un número relativamente corto de satélites experimentales. En las nuevas redes los ingenieros han ideado diversas estrategias para evitar el problema de la atenuación por lluvia y lograr disponibilidades comprendidas entre 99,5 y 99,9 por ciento.

Se han propuesto en total siete sistemas estadounidenses que ofrecerían servicio mundial, aunque ninguno ha pasado de la fase de proyecto. Tres de los sistemas estarían total o parcialmente basados en satélites de órbita baja o media; los otros cuatro, en satélites de la órbita geoestacionaria.

En razón de su numerosa dotación de satélites, las dos propuestas de órbita baja serían las más costosas de realizar. Teledesic probablemente sería el más avanzado de todos los sistemas propuestos, y con sus 288 satélites resultaría seguramente muy costoso. Teledesic proyecta que los satélites orbiten a 1400 kilómetros de altura; el alto número de satélites necesarios se debe en parte a haber elegido esa órbita y en parte a tener que mitigar el desvanecimiento por la lluvia. (Para remediar este último, la zona de cobertura de cada satélite se ha de limitar a un cono muy estrecho.)

El sistema Celestri de Motorola es comparable a Teledesic en cuanto a complejidad y coste. Comprenderá 63 satélites a una altitud de 1400 kilómetros, así como nueve satélites geosíncronos. El segmento geosíncrono se utilizará para los abonados cuyo tráfico no sea sensible al retardo causado por el salto de ida y vuelta desde la órbita geosíncrona. Celestri está diseñado para ofrecer a los abonados acceso a transmisión de datos a velocidades muy altas, desde 64 kilobits por segundo hasta 155 megabits por segundo, y en este aspecto se le considera un cercano competidor del sistema Teledesic.

Los restantes sistemas propuestos para la órbita geoestacionaria son de alcance modesto, con unos costes estimados entre 125.000 millones y 980.000 millones de pesetas. Los de diseño más sencillo son los de Loral y Morning Star Satellite Company, que ofrecerán una cobertura mundial limitada con tres y cuatro satélites, respectivamente. En el otro extremo de la escala se encuentra el proyecto Spaceway de Hughes Communications, que se basa en 16 satélites geosíncronos complementados por 20 satélites de órbita terrestre media. Entre esos dos extremos se sitúan las propuestas de Lockheed Martin y G. E. American Communications (subsidiaria de General Electric), cada una con nueve satélites en órbita y un coste aproximado de 600.000 millones de pesetas.

No parece probable encontrar financiación para más de dos o tres de los siete sistemas de comunicaciones mundiales por satélite que ha propuesto EE.UU. En cierto sentido, estos proyectos son económicamente más arriesgados que los orientados a telefonía vocal antes descritos, dado que la demanda es menos segura. Esto puede agravar el problema de conseguir capital, dejando el campo abierto a las compañías más capaces de iniciar sus proyectos con recursos propios. En este momento las más comprometidas, atendiendo a sus inversiones en estudios de diseño, son Loral, Lockheed Martin, Motorola y Teledesic.

Por añadidura, se cree que en un mercado de consumo el éxito depende de conseguir unos terminales que cuesten menos de 1000 dólares (unas 150.000 pesetas). En esos terminales se han de combinar una pequeña antena parabólica y un transceptor de radio, que podrá ir montado sobre el reflector, con un componente interior que se relacione con el procesador. Para conseguir un coste tan reducido habrá que producir en serie al menos un millón de terminales, condición bastante problemática. Si se consigue rebajar hasta este nivel el precio de los terminales, entonces los satélites desempeñarán un nuevo cometido: proporcionar conexiones de "último tramo" con viviendas y oficinas para transmisión de datos en banda ancha, servicios multimedia y otros afines, pues las líneas telefónicas existentes no pueden transmitir a esa velocidad (aunque ya se trabaja para superar tal limitación).

Más allá de la banda Ka

Pese a que ninguno de los sistemas de banda Ka descritos haya llegado muy lejos en su desarrollo, las compañías están ya solicitando licencias de la FCC para construir sistemas que operen en longitudes de onda todavía más cortas: seis y ocho milímetros. Hughes y Motorola fueron los primeros en registrar su solicitud; según el último recuento, se han propuesto otros 14 sistemas, que totalizan 400 satélites y unos 600.000 millones de pesetas de inversión.

Los sistemas llamados de banda Q/V comportan una notable extensión de capacidad, más allá de la que permiten los sistemas de banda Ka. En esta banda, los efectos de la atenuación por lluvia son todavía más severos; incluso con cielo despejado, las señales de longitud de onda de

seis milímetros se verán afectadas por un factor de atenuación tres a cuatro en trayectos que no se eleven más de 20 grados sobre el horizonte, y ello se debe a que las moléculas de aire absorben parte de la energía electromagnética de las señales. A las dificultades del diseño hay que añadir el hecho de que muy pocos componentes radioeléctricos activos trabajan a longitudes de onda tan cortas, y su coste es bastante elevado. Parece, pues, probable que la banda Ka se ocupe primero, antes de construir ningún sistema para longitudes de onda todavía más cortas.

El desarrollo de las flotas de satélites aquí mencionadas va a incidir marcadamente en amplios sectores. Allá por el 2000 se podrá llamar a casa prácticamente desde cualquier lugar del planeta mediante un terminal de mano parecido a los teléfonos celulares actuales. Para bien o para mal, necesitamos no perder nunca el contacto en cualquier lugar que estemos.

Aparte de los evidentes beneficios para el comercio y el turismo, podrá prestarse un servicio universal, al menos para los que puedan pagarlo, en países donde ahora no existe en absoluto. Dentro de diez años, tal vez se podrá vivir en una zona remota y estar sin embargo conectado a los centros del comercio y diversión a través de Internet y otros medios a velocidades suficientemente altas para admitir películas "a la carta". Pronto nuestro mundo será escenario no sólo de comunicaciones, sino también de torrentes de información que fluyan por todas partes. El que ese mundo parezca menor, mayor o más interesante, dependerá del gusto personal de cada uno.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

SATELLITE SYSTEMS FOR PERSONAL COMMUNICATIONS. John V. Evans en *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, vol. 39, págs. 7-10; junio de 1997.

TELECOMMUNICATION SATELLITE SYSTEMS OF THE FUTURE. John V. Evans, *Encyclopedia of Telecommunications*, vol. 16, 1998 (en prensa).

KA-BAND REPORT. Revisión de los sistemas de banda Ka por una firma consultora del Reino Unido, disponible en la dirección http: //www. spotbeam.com/mansum.htm de la Web.

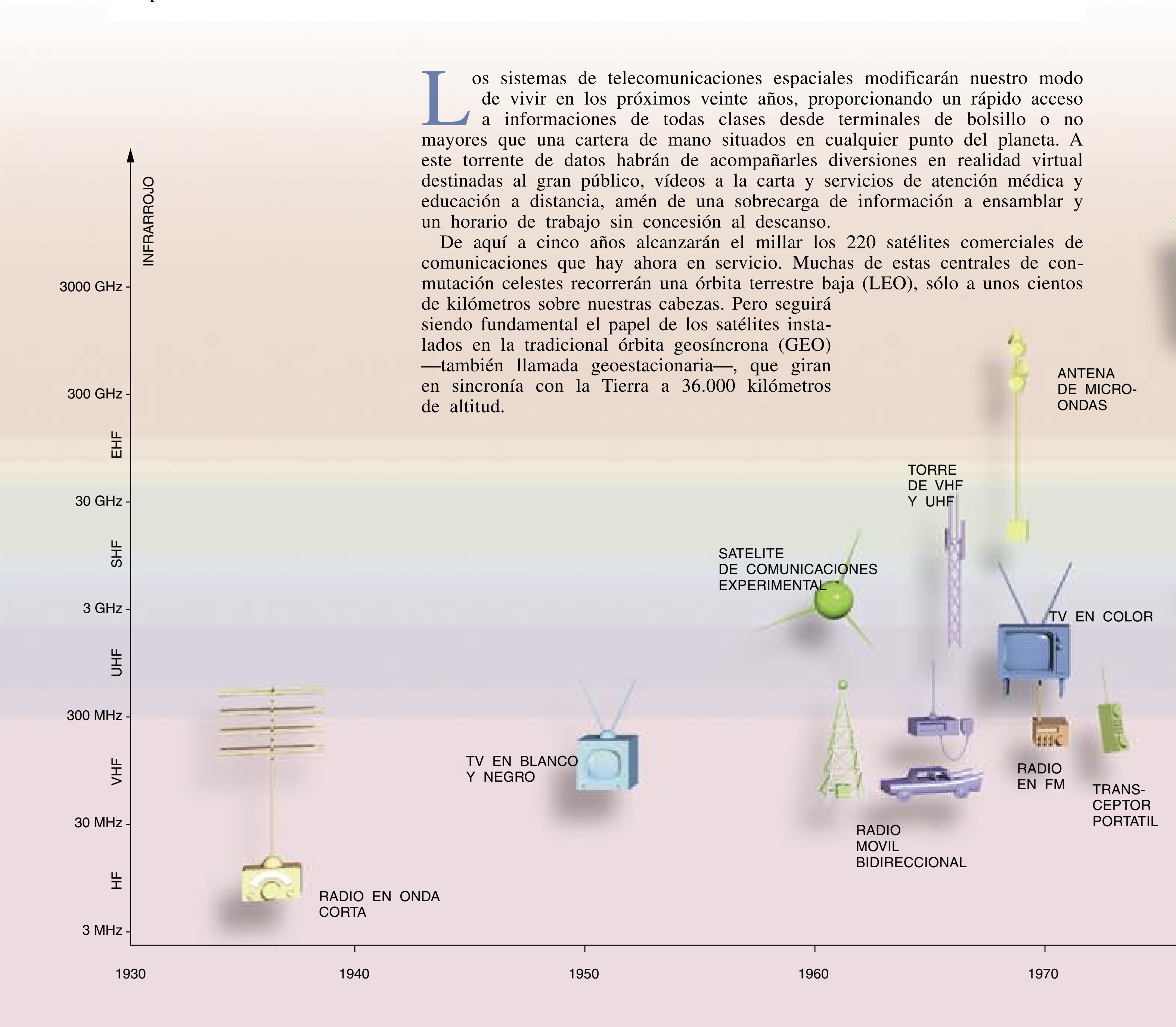
Telecomunicaciones para el siglo XXI

Se combinarán sistemas instalados en satélites y plataformas a gran altura con redes inalámbricas terrestres para ofrecer comunicaciones móviles, de alta velocidad de datos, a escala mundial

Joseph N. Pelton

Los sistemas de telecomunicaciones espaciales modificarán nuestro modo de vivir en los próximos veinte años, proporcionando un rápido acceso a informaciones de todas clases desde terminales de bolsillo o no mayores que una cartera de mano situados en cualquier punto del planeta. A este torrente de datos habrán de acompañarles diversiones en realidad virtual destinadas al gran público, vídeos a la carta y servicios de atención médica y educación a distancia, amén de una sobrecarga de información a ensamblar y un horario de trabajo sin concesión al descanso.

De aquí a cinco años alcanzarán el millar los 220 satélites comerciales de comunicaciones que hay ahora en servicio. Muchas de estas centrales de conmutación celestes recorrerán una órbita terrestre baja (LEO), sólo a unos cientos de kilómetros sobre nuestras cabezas. Pero seguirá siendo fundamental el papel de los satélites instalados en la tradicional órbita geosíncrona (GEO) —también llamada geoestacionaria—, que giran en sincronía con la Tierra a 36.000 kilómetros de altitud.



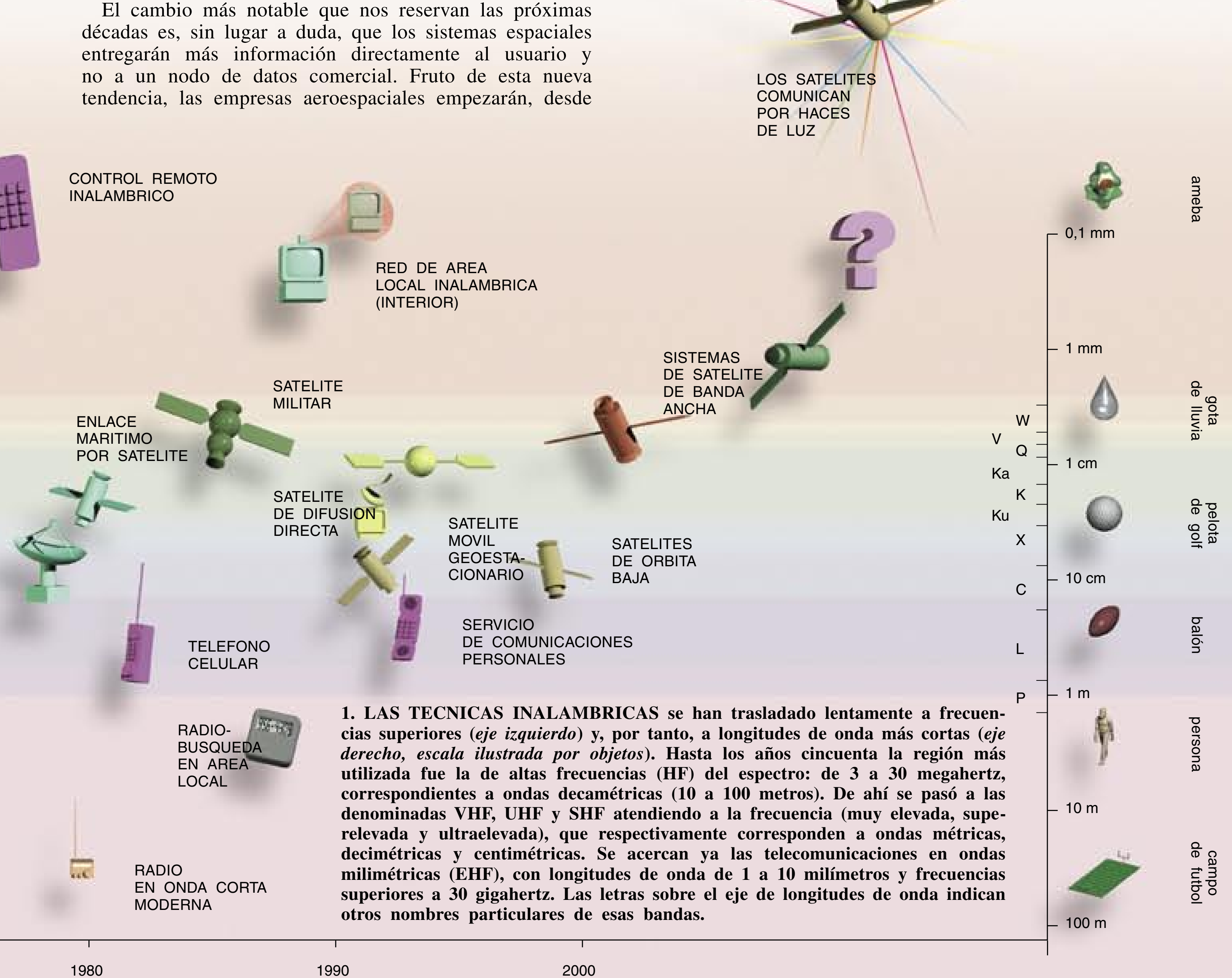
La proximidad de los satélites LEO les da notables ventajas sobre los que hoy orbitan la Tierra. El tiempo que tarda la señal en ir a las órbitas bajas y regresar es de centésimas de segundo, lo que reviste su interés si se compara con el cuarto de segundo que necesitan los datos para recorrer en ambos sentidos el camino a la GEO. Como tantos a favor, señalaremos que esta rápida operación hará más práctico y atractivo el acceso a las redes y a las videoconferencias. Como tantos en contra, mencionemos que los sistemas LEO requieren 20 veces más satélites que un sistema GEO para cubrir todo el globo, y cinco veces más que una red de órbita media (MEO).

Los satélites dejarán muy pronto de ser el único tipo de sistema de telecomunicación asentado en el espacio. Hacia el 2000 podríamos contemplar plataformas de gran altitud y larga duración: las HALE (High Altitude Long Endurance). Suspendidas sobre las ciudades, concentrarán hacia ellas haces de señales con un rico contenido de datos. Estas originales naves sin tripulación humana se propulsarán por medios electrónicos y volarán o flotarán durante días en el "protoespacio" a más de 20.000 metros de altura, por encima del tráfico aéreo comercial.

El cambio más notable que nos reservan las próximas décadas es, sin lugar a duda, que los sistemas espaciales entregarán más información directamente al usuario y no a un nodo de datos comercial. Fruto de esta nueva tendencia, las empresas aeroespaciales empezarán, desde principios de siglo, a competir con AT&T, MCI, British Telecom y otros operadores.

Apenas hace unos años se necesitaban voluminosas antenas de reflector parabólico para obtener una conexión vía satélite de mayor velocidad que la del servicio telefónico. Tales enlaces, además, escaseaban y el servicio marítimo costaba más de 1000 pesetas por minuto. Todas estas limitaciones van desapareciendo. Esperamos que llegue a través del espacio una avalancha de datos de alta velocidad, generando incalculables beneficios para individuos y empresas de todo el mundo. Supondrá una auténtica bendición para Brasil, India, China y otros países en vías de desarrollo, que carecen de grandes redes de fibra óptica.

La innovación esencial para atender la eclosión de demanda es la antena de elementos en fase. Este refinado dispositivo electrónico, hasta ahora reservado para comunicaciones militares, consta de múltiples elementos transmisores colocados en una red geométrica fija. Dicha



1. LAS TECNICAS INALAMBRICAS se han trasladado lentamente a frecuencias superiores (*eje izquierdo*) y, por tanto, a longitudes de onda más cortas (*eje derecho, escala ilustrada por objetos*). Hasta los años cincuenta la región más utilizada fue la de altas frecuencias (HF) del espectro: de 3 a 30 megahertz, correspondientes a ondas decamétricas (10 a 100 metros). De ahí se pasó a las denominadas VHF, UHF y SHF atendiendo a la frecuencia (muy elevada, superelevada y ultraelevada), que respectivamente corresponden a ondas métricas, decimétricas y centimétricas. Se acercan ya las telecomunicaciones en ondas milimétricas (EHF), con longitudes de onda de 1 a 10 milímetros y frecuencias superiores a 30 gigahertz. Las letras sobre el eje de longitudes de onda indican otros nombres particulares de esas bandas.

JOSEPH N. PELTON enseña telecomunicaciones en la Universidad de Colorado en Boulder y en la Universidad Internacional del Espacio en Estrasburgo.

red puede programarse para emitir una retícula de haces radioeléctricos conformados electrónicamente que permita el seguimiento de blancos móviles o, en opción alternativa, que reciba señales de ciertas direcciones sólo.

En su concepción, estas antenas vienen a ser versiones en miniatura de la red de antenas gigantes, VLA (Very Large Array), conjunto de radiotelescopios erigido en Socorro, para investigaciones astrofísicas. Las redes de elementos en fase consiguen la selectividad direccional aplicando diminutos retardos a las señales emitidas o recibidas por diferentes partes de la red. Al enfocar de este modo los haces se reduce la interferencia, gran ventaja si se considera la creciente demanda del espectro radioeléctrico. La presión sobre el espectro se intensificará porque las señales de datos a alta velocidad necesitan una anchura de banda mucho mayor —una porción de espectro mucho más extensa— que las señales de baja velocidad.

Las antenas de elementos en fase instaladas en satélites pueden modificar la dirección de los haces de medio en medio grado hacia los receptores deseados. Además, son "adaptativas"; es decir, se reprogramarán continuamente bajo el control de unos supercomputadores de a bordo, no mayores cuando se terminen que una caja de zapatos. Esta flexibilidad se inició hace diez años con las antenas parabólicas modificadas. La tendencia se mantendrá. Por tanto, los satélites del siglo XXI podrán "reutilizar" la misma porción de espectro muchas veces. La reutilización no tardará en centuplicarse en algunos satélites, para multiplicarse por mil con el tiempo.

Cabe esperar que las redes en fase se popularicen también en la superficie terrestre, ya que permiten dirigir haces a satélites que describen órbitas conocidas sobre nuestras cabezas. Además, es posible construir redes ajustables a casi todas las formas que se desee, lo que reviste un atractivo especial para aviones y coches. En los cinco años siguientes deberían incluso aparecer versiones en miniatura para transceptores de bolsillo.

El mayor obstáculo económico con que tropiezan los satélites en países industrializados es la competencia de los sistemas de fibra óptica para ofrecer servicios de datos a alta velocidad o de banda ancha directamente a viviendas u oficinas. Un sistema de satélite no puede igualar la velocidad de transmisión que permite un cable de fibra óptica. En la realidad, sin embargo, la mayoría de los usuarios dependen de uno o dos kilómetros de hilos telefónicos de cobre pareados o de un cable coaxial, mucho más lentos, para recibir la voz y los datos desde un centro de distribución local.

El problema que podría llamarse del "último tramo" es el gran cuello de botella de las redes alámbricas. Las compañías telefónicas han desarrollado un modo de aumentar las velocidades de datos transmitidos por cables e hilos desde decenas de miles hasta algunos millones de bits por segundo. Pero a pesar de las mejoras en precios y calidades que consigue esta técnica de xDSL, todavía resulta costosa y no es probable que satisfaga la demanda de comunicaciones en banda ancha.

A muchos usuarios domésticos de la Telaraña (World Wide Web), por ejemplo, les contrarían los retardos en la importación de gráficos. Una conexión de banda ancha por Internet transporta datos 50 veces más aprisa que una conexión telefónica típica conmutada de 28,8 kilobits por segundo; la televisión de alta definición se traga los bits a velocidades que multiplican por 20 o 30 las anteriores. En la próxima década, multitud de usuarios querrán disponer de datos a muchos megabits por segundo en cada sentido de transmisión. En consecuencia, los satélites quizá disponen de una ventana de oportunidad de 10 años en el mercado de los multimedios.

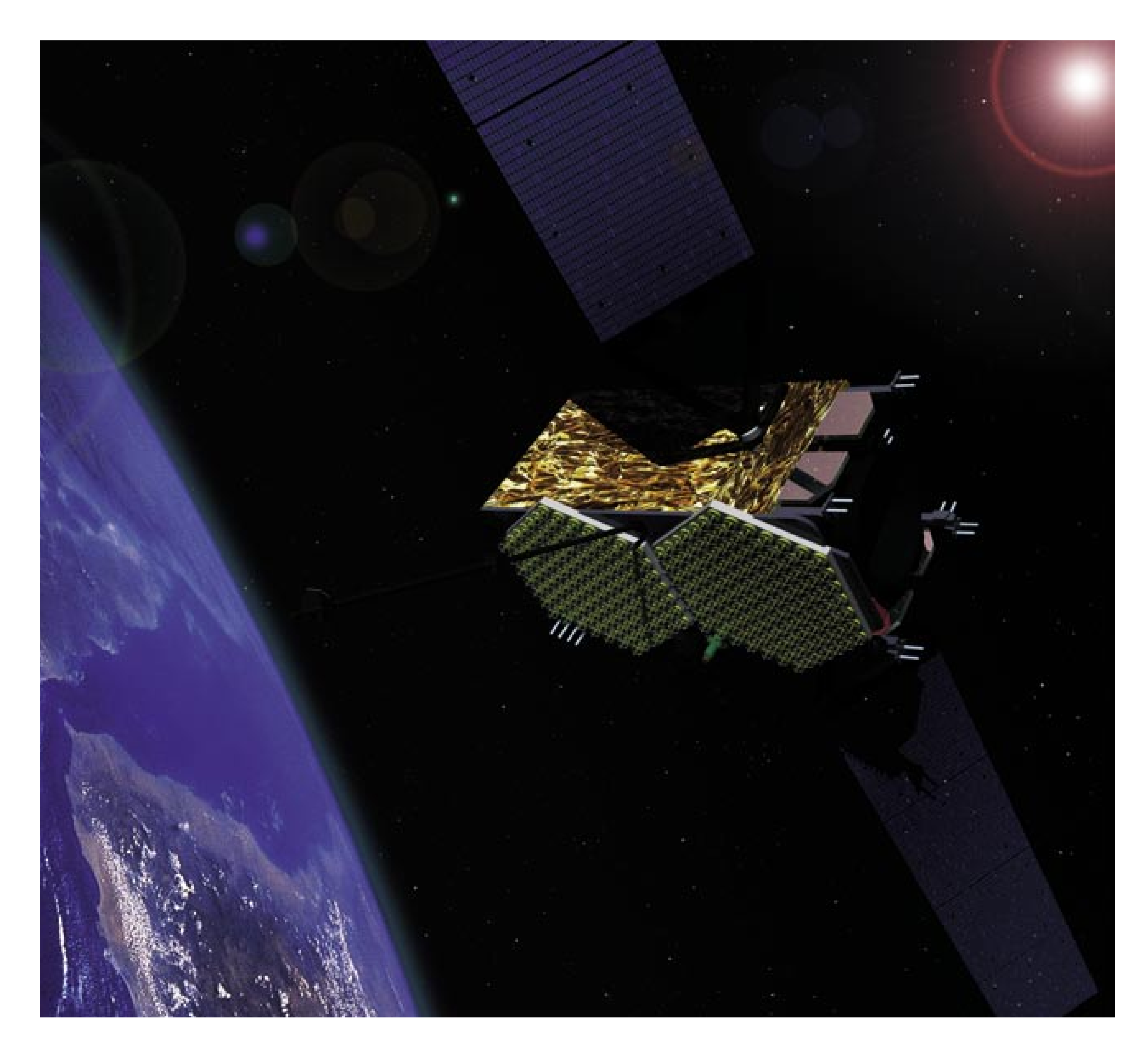
El inminente renacimiento de los satélites no siempre fue evidente. En 1993 Nicholas Negroponte aventuró que el futuro de las telecomunicaciones se asemejará a un inmenso dispositivo biestable ("flip-flop"). Los servicios de banda estrecha, teléfono y radiobúsqueda que ahora suelen transmitirse a larga distancia por fibra de vidrio, pasarán a la transmisión inalámbrica. Al mismo tiempo, el coste y la limitación del espectro radioeléctrico disponible obligarán a que los servicios de banda ancha recorran el camino opuesto, de ondas de radio y satélites a fibra óptica y cable coaxial. A eso se le llama basculador de Negroponte.

En un artículo publicado en la revista *Telecommunications*, sostuve que Negroponte se equivocaba. El futuro nos va a presentar una mezcla digital "rica pero confusa" de servicios por fibra óptica, cable coaxial, medio inalámbrico terrestre y por satélite que transportarán todo tipo de contenidos, desde voz hasta servicios multimedia y vídeo de banda ancha. Dentro de este escenario, los usuarios pedirán acceso desde terminales móviles a servicios de banda ancha, así como a otros de banda estrecha menos exigentes. En mi opinión, en esa mezcla tendrá tanta importancia la fibra de vidrio como los satélites y las redes inalámbricas; la clave técnica residirá en los protocolos que aseguren una interconexión sin discontinuidad alguna entre dichos medios.

Este punto de vista, que *Telecommunications* llamó "combinación Pelton", supone, en caso de ser correcto, que los técnicos habrán de afrontar el reto de desarrollar servicios de banda ancha vía satélite susceptibles de interconexión con sistemas basados en fibra óptica y en cable coaxial. De ahí se desprende que los satélites de comunicaciones de la próxima generación habrán de operar a velocidades 1000 veces mayores que a comienzos de nuestro decenio. Y que se necesitarán con urgencia nuevos protocolos de conversión de datos y normas de "sistemas abiertos", que podrían utilizar los fabricantes para construir nuevos equipos compatibles.

Los grandes adelantos en la técnica de satélites dan cada vez mayor credibilidad al modelo de combinación. En los cinco últimos años, los servicios inalámbricos y los satélites han experimentado un crecimiento sin par. Hoy pueden ofrecer una transmisión por línea telefónica a un coste baratísimo. Además, el servicio de telecomunicaciones de más rápida expansión es la televisión por satélite de difusión directa (DBS), que utiliza orbitadores geosíncronos para dirigir las señales a más de 20 millones

2. EL SATELITE DE COMUNICACIONES del siglo que viene tendrá dos antenas de elementos en fase, que en este ejemplo son estructuras hexagonales, para transmitir y recibir señales en numerosos haces "puntuales" estrechos. Los paneles solares (*rectángulos alargados*) suministran energía a los dispositivos electrónicos instalados a bordo, incluidos los procesadores que controlan las antenas y manejan miles de enlaces de voz o datos. El satélite se halla en órbita terrestre media (MEO) a unos 10.300 kilómetros de altitud.



de abonados en todo el mundo. Los estudios de mercado predicen que el total podría triplicarse para el 2005. Pese a lo cual, Negroponte sostiene que la televisión debería transmitirse por cable.

Los satélites deben superar todavía notables limitaciones técnicas. Una muy importante es el coste altísimo del lanzamiento de una carga útil y el seguro que comporta. Se necesitan con urgencia nuevas soluciones para situar equipos en órbita de un modo fiable y a costes mucho más asequibles. Se investigan otros sistemas de lanzamiento, así cohetes y reactores reutilizables, pero hasta ahora ninguno ha podido comprobarse.

Otros retos derivan de la necesidad de utilizar el espectro radioeléctrico con la mayor eficacia posible. Todos los sistemas modernos transmiten la información digitalizada; por tanto, la compresión digital de los datos es un modo eficaz de abordar el problema. El DBS se aprovecha de una nueva norma del Grupo de Expertos sobre Imágenes en Movimiento, la MPEG2, que permite transmitir imágenes vídeo de alta calidad a las pantallas del televisor doméstico a velocidades de seis megabits por segundo nada más. Gracias a esta norma el satélite de un gigabit por segundo llamado DirecTV puede transmitir más de 150 canales de televisión, además de muchos canales de audio de calidad equiparable a la de un disco compacto. Por esa misma razón hay sistemas móviles que comprimen las señales vocales digitalizadas.

Puesto que las frecuencias altas tienen mayor capacidad de transporte de datos que las bajas, la frecuencia de las bandas utilizadas para transmisión inalámbrica ha ido en continuo aumento, desde las decenas de megahertz de mediados del siglo hasta casi 100 gigahertz en los proyectos más ambiciosos de hoy día. Pero transmitir y procesar miles de señales consume una energía considerable, recurso que escasea en los satélites. El reto es particularmente duro para los satélites geoestacionarios (GEO), que han de trabajar con enorme número de haces y transmitirlos a 40.000 kilómetros de distancia.

La potencia pone asimismo a prueba los satélites que prestan servicios móviles, dado que las pequeñas antenas de los transceptores portátiles actuales sólo captan una minúscula fracción de la señal emitida por el satélite. El satélite necesitará entonces mayor potencia y más sensibi-

lidad. En ese marco, la potencia de los paneles solares de un satélite geoestacionario ha aumentado desde dos kilowatt hasta más de 10 kilowatt en los últimos cinco años. En parte ello se ha conseguido por agrandar la superficie de los paneles y en parte por una mejora del rendimiento. Las células solares de nuevos materiales (combinación de arseniuro de galio y germanio) han logrado rendimientos próximos al 23 por ciento, el doble del valor obtenido con el silicio amorfo.

Los rendimientos podrían superar el 30 por ciento en los cinco próximos años merced al empleo de concentradores de luz solar para someter las células a radiaciones más intensas, junto con dispositivos multiunión que captan luz infrarroja y ultravioleta a la par que la luz visible. Los paneles solares flexibles capaces de generar al menos 60 kilowatt ofrecen una clara posibilidad en el futuro. Será muy conveniente utilizar mejores pilas de combustible y baterías de alta prestación.

Para la transmisión a altas velocidades se necesitan antenas de gran tamaño, especialmente en los sistemas GEO. Podemos ya construir antenas de satélite parabólicas de 10 metros de diámetro. Pero debería llegarse hasta los 20 o 30 metros. Hasta ahora, el proyecto más ambicioso de antena de satélite con red de elementos en fase está en el satélite japonés Gigabit. La antena receptora de este satélite tendrá alrededor de tres metros de diámetro y comprenderá 2700 células o elementos de antena individuales. Podrán obtenerse en el futuro antenas mayores, con decenas de miles de células, a medida que se adquiera experiencia en el diseño y en la fabricación en serie de los dispositivos a coste reducido.

Sin embargo, para conquistar el gran mercado los proveedores de servicios tendrán que reducir el coste de los terminales terrestres a los niveles mínimos posibles. A este objetivo contribuirán unos diseños más perfeccionados y el empleo de técnicas de fabricación a gran escala. Existen ahora terminales DBS de sólo 30 centímetros de diámetro, y su precio está cayendo por debajo de las 30.000 pesetas. En el futuro, las redes de elementos en fase basadas en arseniuro de galio probablemente abaratarán los costes de las antenas en el espacio y en la superficie terrestre.

Casi todos los satélites de comunicación actuales se encuentran en la órbita geoestacionaria (GEO). Comenzando con los de la Organización Internacional de Telecomunicaciones por Satélite (Intelsat) en 1965, la mayoría de ellos se han comunicado con estaciones terrestres fijas. Hace más de diez años, la Organización Internacional de Telecomunicaciones Marítimas por Satélite (Inmarsat) inició la telefonía móvil y la transmisión de datos en los barcos, y en este último año la Sociedad Americana de Satélites para servicios Móviles y Telesat Mobile de Canadá han introducido servicios similares en América del Norte para usuarios móviles de tierra firme. Al construir satélites con antenas mayores, estas compañías han reducido los costes, pero sus servicios se han visto afectados por dificultades de transmisión (y por un deficiente tratamiento del mercado).

Los problemas de ingeniería que plantean los satélites geosíncronos explican el gran interés despertado desde hace unos años por los sistemas que utilizan satélites LEO, a altitudes menores de 1600 kilómetros, o MEO, de 10.000 a 16.000 kilómetros de altura. (Se evita la zona intermedia, donde el cinturón de radiación de Van Allen amenazaría el funcionamiento de los satélites.)

Además de ser más rápidos que los GEO, los sistemas LEO pueden utilizarse con terminales más pequeños, dado que el satélite suele estar unas 40 veces más cercano a la Tierra. Dentro de un año o dos está previsto que tres nuevos sistemas móviles terrestres LEO y MEO de alcance mundial —Iridium, ICO (de ICO Global Communications) y Globalstar— comiencen a ofrecer telefonía y radiobúsqueda global.

La desventaja de los sistemas LEO y MEO es que los satélites cercanos a la Tierra cruzan el firmamento en una o dos horas, en vez de permanecer fijos en un punto (como los GEO). Para que la recepción sea buena, los usuarios siempre han de poder ver al menos un satélite que esté levantado sobre el horizonte; si el “ángulo de visión” es muy abierto, resultarán mínimas las pérdidas



EL SATELITE DE ORBITA BAJA (LEO) se acerca a unos pocos cientos de kilómetros de la Tierra y enlaza con un retardo muy pequeño a usuarios separados por distancias comparables. Para cubrir el globo, sin embargo, se requiere un gran número de satélites.



LAS PLATAFORMAS DE GRAN ALTITUD Y LARGA DURACION (HALE) sobrevolarán en los próximos años la Tierra a más de 20.000 metros de altura, poniendo en intercomunicación a usuarios distantes entre sí hasta 500 kilómetros. Unas pueden ir sobre dirigibles y otras en aviones.

SATELITE en órbita geoestacionaria a unos 40.000 km de altura para poner en contacto usuarios móviles que distan entre sí miles de kilómetros.

causadas por árboles y edificios. Esta exigencia justifica el elevado número de satélites que han de emplear los sistemas MEO y LEO para conseguir una cobertura mundial continua: cerca de 60 para las redes LEO. El coste de la construcción y el lanzamiento de tantos satélites ronda, si no supera, el billón de pesetas, y han de adoptarse estrictas medidas para garantizar que los satélites abandonados y los despojos orbitales del lanzamiento no se conviertan en un peligro.

Para ofrecer servicios de banda ancha asequibles —como son las aplicaciones interactivas de los multimedios— a través de antenas de escritorio, los sistemas de satélite tendrán que usar las frecuencias más elevadas, por encima de los 20 gigahertz. Aun con la intensa reutilización de las frecuencias que permiten las antenas de elementos en fase, estos sistemas necesitarán grandes porciones del espectro. Actualmente hay varios sistemas LEO y MEO de banda ancha en desarrollo: Teledesic de Bill Gates y Craig McCaws, Skybridge de Alcatel y Celestri de Motorola (un híbrido de LEO y GEO). Diversos consorcios han propuesto al menos una docena más de redes multimedia de banda ancha, en su mayoría sistemas GEO. Estas redes emplearían sistemas de gran potencia para dirigir sus señales a los microterminales terrestres, aunque no se construirán todos.

El elevado coste de los sistemas multisatélite de banda ancha explica el entusiasmo que despiertan las plataformas HALE, cuyo lanzamiento no requiere una onerosa inversión y pueden recuperarse para mantenimiento. Los estudios indican que estas plataformas podrían admitir antenas de elementos en fase con unos 3500 haces, lo cual permite no sólo comunicaciones móviles en ambos sentidos sino también distribución de vídeo en una zona de 500 km de extensión. En estos sistemas se reutilizarán 100 veces las frecuencias, y habrá acceso a satélites para establecer conexiones mundiales.

Se están examinando cuatro tipos básicos de plataformas HALE: dirigibles llenos de helio con piloto automático y estabilizados por motores iónicos, unidades propulsadas por células solares o pilas de combustible, plataformas con motores de pistones, y plataformas con motor de reacción. Estas soluciones tropiezan con limitaciones dispares: a las plataformas propulsadas por células solares y pilas de combustible les resultará difícil reunir la suficiente potencia, pero las de motor de pistones o reactores sólo podrán mantenerse arriba unos días.

Otro enfoque posible para la provisión de servicios de banda ancha consiste en trasladarse a frecuencias tan altas, que se necesite menos reutilización. Por desgracia existe un obstáculo: la lluvia. Los sistemas de satélite de frecuencia más elevada que hoy se consideran utilizan longitudes de onda comparables al tamaño de las gotas de lluvia. Las gotitas actúan ahí como lentes, curvando las ondas y distorsionando las señales. Este efecto puede mitigarse mediante técnicas de corrección de errores, utilizando más potencia cuando sea necesario y empleando un mayor número de terminales terrestres (a fin de que las señales puedan seguir diversos trayectos). Estas medidas, sin embargo, repercuten en el precio total.

El cambio a longitudes de onda inferiores a un milímetro presenta otros obstáculos. Los haces de rayos infrarrojos y visibles —el siguiente paso lógico— se absorben con facilidad en la atmósfera, por lo que en el próximo futuro su empleo se limitará quizás al interior de los edificios. Pero los ensayos realizados a mediados de los noventa con el Satélite de Pruebas VI de la ingeniería japonesa han reavivado las esperanzas de que algún día pueda ser viable la comunicación con satélites por medio de haces de láser. Es muy probable que una red basada en láser transporte sólo grandes flujos de tráfico y se apoye en múltiples estaciones terrestres para reducir al mínimo las pérdidas que acarrea el clima adverso.

Lo que no tiene vuelta de hoja es que los sistemas inalámbricos reforzarán su predominio en los próximos 20 años, y que se asentarán sobre un rico surtido de técnicas. Las universidades, los gobiernos y la industria tienen todos una misión que cumplir para llevar estos sistemas a término. Pero hay muy pocos cursos en los que se capacite a los alumnos para abordar las cuestiones emergentes.

Una posibilidad digna de un serio análisis es la de establecer un instituto de ámbito mundial donde se promueva la capacitación técnica requerida. En la viabilidad de un plan de este tipo andamos investigando algunos. Pero aunque tal instituto llegara a crearse, la escasez de adecuadas especializaciones en ciencia e ingeniería puede todavía levantar una importante barrera ante el progreso. Es preciso buscar más soluciones, porque mejorar la comunicación y la educación aporta inmensos beneficios a la sociedad.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

A EUROPEAN STRATEGY FOR FUTURE SATELLITE COMMUNICATIONS SYSTEM. E. W. Ashford en *Space Communications*, vol. 14, n.º 3, págs. 151-154; 1996.

OVERVIEW OF SATELLITE COMMUNNICATIONS. J. N. Pelton en *Encyclopedia of Telecommunications*, vol. 14. Marcel Dekker, 1997.

GLOBAL SATELLITE COMMUNICATIONS TECHNOLOGY AND SYSTEMS. Joseph N. Pelton y otros. WTEC, Baltimore (en prensa).



LAS TORRES CELULARES (*pequeñas estructuras en tierra*) pueden atender regiones de unos pocos kilómetros de anchura. Ciertos sistemas combinarán las técnicas celulares terrestres y de satélite.

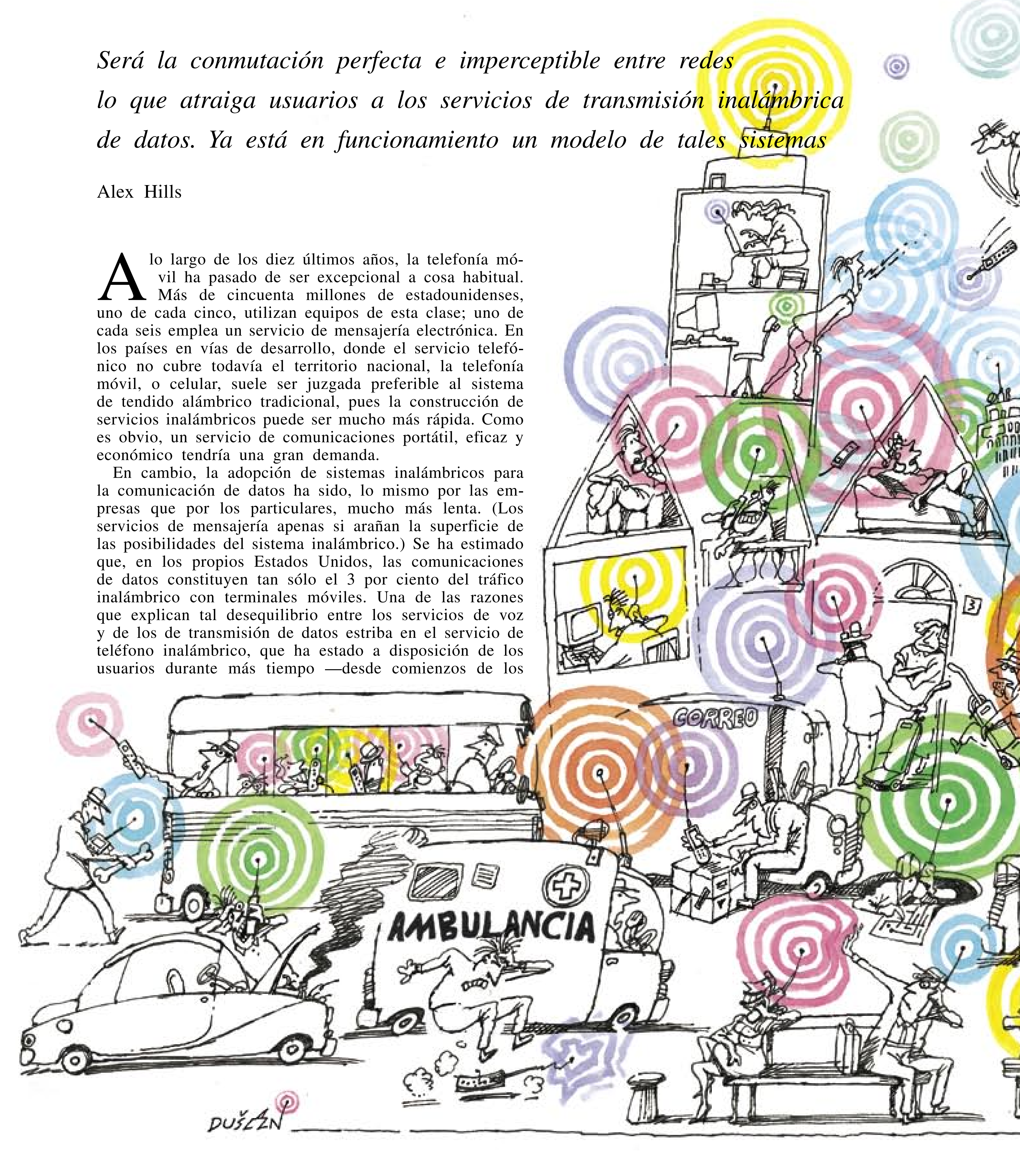
Redes inalámbricas terrestres

Será la conmutación perfecta e imperceptible entre redes lo que atraiga usuarios a los servicios de transmisión inalámbrica de datos. Ya está en funcionamiento un modelo de tales sistemas

Alex Hills

A lo largo de los diez últimos años, la telefonía móvil ha pasado de ser excepcional a cosa habitual. Más de cincuenta millones de estadounidenses, uno de cada cinco, utilizan equipos de esta clase; uno de cada seis emplea un servicio de mensajería electrónica. En los países en vías de desarrollo, donde el servicio telefónico no cubre todavía el territorio nacional, la telefonía móvil, o celular, suele ser juzgada preferible al sistema de tendido alámbrico tradicional, pues la construcción de servicios inalámbricos puede ser mucho más rápida. Como es obvio, un servicio de comunicaciones portátil, eficaz y económico tendría una gran demanda.

En cambio, la adopción de sistemas inalámbricos para la comunicación de datos ha sido, lo mismo por las empresas que por los particulares, mucho más lenta. (Los servicios de mensajería apenas si arañan la superficie de las posibilidades del sistema inalámbrico.) Se ha estimado que, en los propios Estados Unidos, las comunicaciones de datos constituyen tan sólo el 3 por ciento del tráfico inalámbrico con terminales móviles. Una de las razones que explican tal desequilibrio entre los servicios de voz y de los de transmisión de datos estriba en el servicio de teléfono inalámbrico, que ha estado a disposición de los usuarios durante más tiempo —desde comienzos de los



ALEX HILLS imparte política de telecomunicaciones y supervisa un abanico de servicios en red en la Universidad Carnegie Mellon.

años ochenta— que el de datos. Y en los países industrializados, hacía mucho que todo el mundo estaba habituado a servirse del teléfono. En cambio, los ordenadores no se han generalizado hasta hace poco; por consiguiente, las aplicaciones para enlaces inalámbricos de datos están mucho menos maduras.

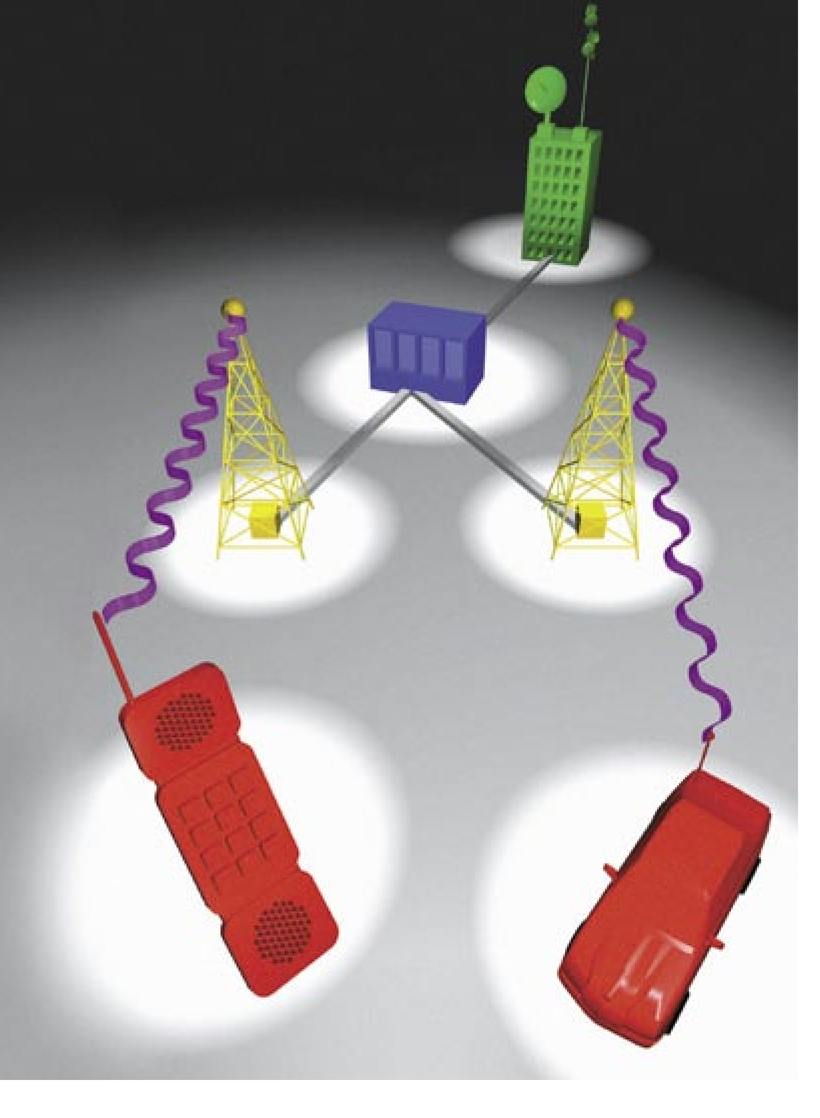
Debido en parte a lo dicho, no existe ninguna red universal inalámbrica de comunicación de datos que sea comparable con el sistema público de telefonía. Los usuarios tienen ante sí un abanico de opciones, ninguna de las cuales satisface la mayoría de las necesidades. Las redes inalámbricas de área local (LAN) pueden servir de solución para un edificio. Mas para prestar servicio a toda una área metropolitana se precisará otra red. Serán varias las opciones. Un estándar universal para todos los tipos de transmisión inalámbrica de datos garantizaría que cualquier ordenador portátil o asistente digital pudiera hablar con cualquier red inalámbrica. Para nuestro infortunio no existe una norma de tales características.

A pesar de que la transmisión de datos por radio no ha avanzado con la celeridad predicha por los optimistas, el autor y otras muchas personas atentas al desarrollo de esta técnica opinan que ya se encuentra a punto para la adopción a gran escala. Tal opinión se apoya en diversas observaciones.

Ante todo, el servicio de telefonía móvil se popularizó en cuanto los aparatos se hicieron lo suficientemente ligeros y pequeños para poderlos llevar en el bolsillo. A principios de los años ochenta, cuando se introdujo el servicio de



1. EN LOS AÑOS VENIDEROS, la conjunción de ordenadores ligeros y cómodos de utilizar con los ubicuos teléfonos móviles va a engendrar un profusión de enlaces inalámbricos.



2. UNA RED CELULAR interconecta a los usuarios (*el coche rojo y el teléfono portátil*) mediante enlaces de radio hasta las sedes de células individuales (*torres amarillas*), distantes, por lo general, pocos kilómetros. Las sedes de células contiguas utilizan frecuencias diferentes para evitar interferencias. Los emplazamientos de las células están conectados mediante cables de fibra óptica a una oficina-centralita de telefonía móvil (*azul*), que se encarga de buscar a los destinatarios de las llamadas y de mantener activas las conexiones (*violeta*). La centralita se encuentra, a su vez, conectada a una central del servicio telefónico público (*verde*), desde la cual las llamadas son encaminadas hasta cualquier lugar del mundo, sea vía satélite, por cable o por enlaces de microondas.

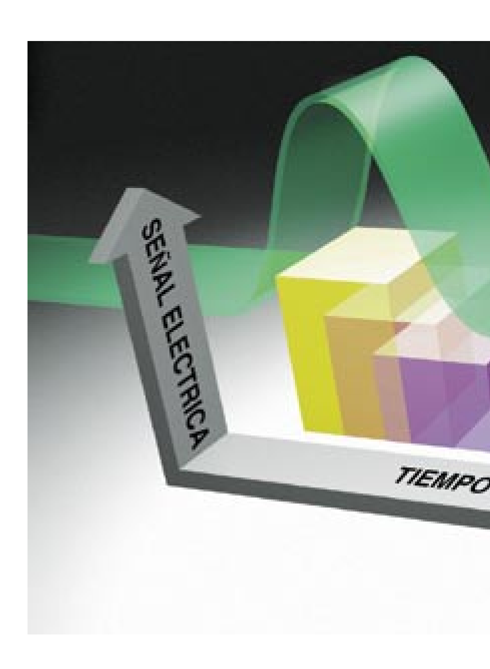
telefonía móvil, las unidades eran tan voluminosas, que habían de instalarse en el maletero de los vehículos.

Durante los últimos años, también los ordenadores han ido reduciendo sus dimensiones. A estos equipos se les va dotando de un número creciente de servicios inalámbricos, posibilitando el acceso a Internet y a otras redes de datos. Uno de estos equipos, el Nokia 9000, estaba disponible en Europa a mediados de 1996, y en los Estados Unidos, a principio de 1998. Con un peso de sólo 435 gramos, es una combinación de teléfono móvil, ordenador para Internet, explorador de la Telaraña (World Wide Web), fax, terminal de recepción de mensajes y organizador personal. Conforme se vayan generalizando estas características, no tardará en difundirse la conexión inalámbrica a Internet y a otras redes de datos.

Una segunda razón para estimar que los servicios inalámbricos de transmisión de datos van a florecer es que el Instituto de Ingeniería Eléctrica y Electrónica (IEEE), una influyente organización profesional estadounidense, adoptó en junio de 1997 una norma para redes inalámbricas de área local (LAN). Aunque esta norma, denominada IEEE 802.11, se refiere a sistemas para redes de área local, debería acicatear a los fabricantes de todo el mundo a construir equipos conectables a multitud de redes inalámbricas locales, no sólo a las de sus sistemas matrices. La norma tiene previsto el funcionamiento mediante dos técnicas de transmisión diferentes, pero los usuarios podrían gravitar hacia una de ellas y establecer así un estándar *de facto*, que alcanzase amplia difusión en los años venideros.

Un tercer motivo para la confianza es que ya existe un sistema inalámbrico de transmisión de datos a gran velocidad, un sistema fácil de utilizar y operativo a la escala de un recinto universitario. El autor y varios colegas han construido una red que da servicio a la mitad de la Universidad Carnegie Mellon; enlaza, de forma imperceptible para el usuario, con una red comercial metropolitana más lenta. Los usuarios pueden desplazarse libremente con sus ordenadores móviles (portátiles, por lo general) y trabajar con ellos igual que con los de sobremesa. (Describiré más adelante este sistema con mayor detalle.)

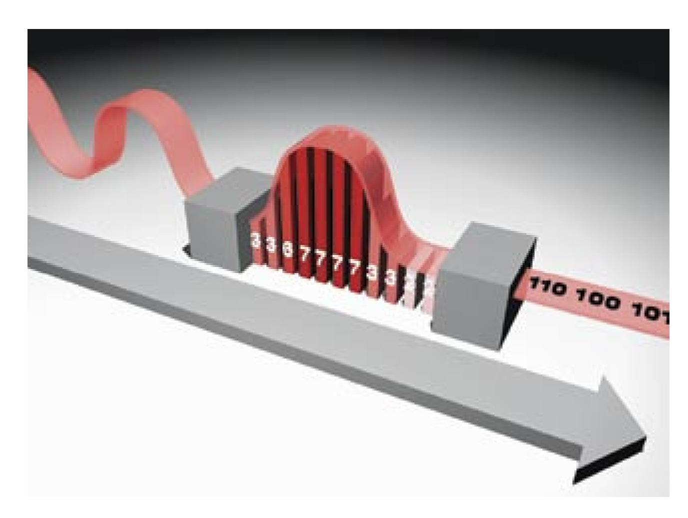
Los servicios inalámbricos de datos no llegarán nunca a eliminar la necesidad de enlaces y conexiones cableadas. Algunas de las aplicaciones que están apareciendo para sistemas de ordenadores interconectados, como el vídeo y los multimedios, exigen velocidades de transferencia celerísimas. Existen limitaciones físicas intrínsecas que restringen la velocidad máxima de los enlaces inalámbricos, por lo que las conexiones más rápidas probablemente habrán de hacerse por cable. Además, dado que las redes inalámbricas exigen siempre el respaldo de una infraestructura cableada, amén de los equipos de emisión y recepción correspondientes, resultan, con frecuencia, más onerosos que los sistemas cableados. Pero conforme la movilidad vaya adquiriendo mayor valor e importancia, los enlaces inalámbricos resultarán una opción cada vez más atractiva.



3. LOS EFECTOS multitrayecto pueden distorsionar una señal digital por “dispersión del tiempo de tránsito”. Los reflejos de la señal en los edificios y el suelo producen bits de datos (*bloques morados y naranjas*) que llegan al receptor más tarde que los bits de una señal directa (*bloques amarillos*), porque su trayecto desde el emisor es un poco más largo. Los bits demorados se suman a los bits directos, produciendo una señal agregada distorsionada (*cinta verde*), que el receptor puede interpretar erróneamente, falseando los datos.

Los sistemas inalámbricos acostumbran establecerse en torno a estaciones fijas de emisión y recepción, que se comunican con equipos portátiles, así como con redes alámbricas, no pocas veces, del sistema de telefonía pública. Las redes inalámbricas de voz van desde los teléfonos portátiles, sin cordón, como los de uso doméstico, hasta sistemas globales de comunicaciones vía satélite. En situación intermedia se encuentran las centralitas inalámbricas, que suministran servicio en el interior de un edificio o de un recinto universitario, y los sistemas celulares y de comunicaciones personales, que cubren áreas del tamaño de una ciudad.

Análogamente, los sistemas de transmisión de datos van desde redes locales inalámbricas, que operan a unos 2 megabits por segundo, hasta comunicaciones vía satélite. Las redes de mensajería y las redes bidireccionales de radio-paquetes suministran un servicio de datos más lento, de hasta 19,2 kilobits por segundo, en zonas metropolitanas o mayores. (Las redes de envío por paquetes reciben tal nombre porque descomponen un flujo de datos en paquetes discretos, que son encaminados a la "dirección" del destinatario deseado.) Estas redes suelen ser utilizadas por industrias cuyos trabajadores tienen que cambiar de lugar frecuentemente.

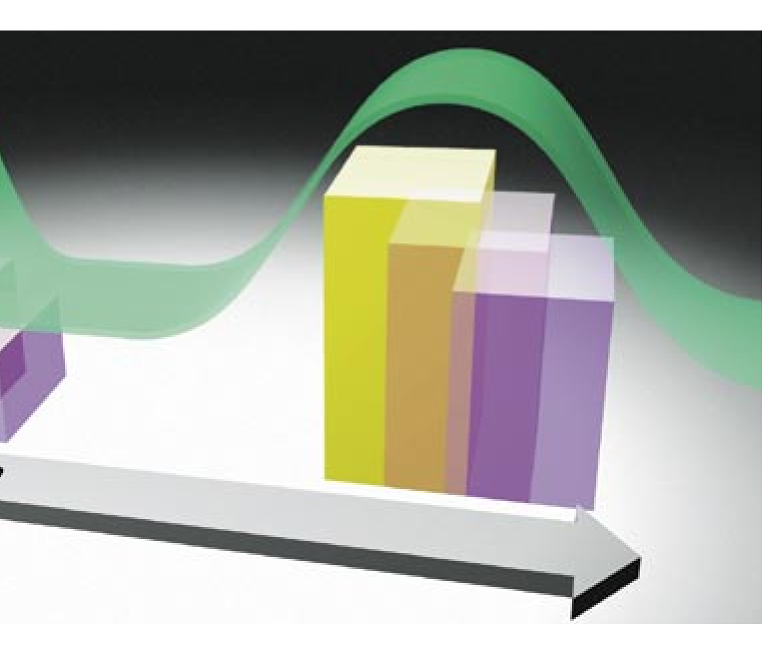


4. LOS MODERNOS SISTEMAS de telecomunicaciones convierten una señal de voz en una ristra de bits (datos binarios) antes de enviarlos a larga distancia. La señal de voz, analógica (*cinta rosada, a la izquierda*), se mide millares de veces por segundo; cada resultado se expresa en forma numérica (*barras verticales, en el centro*). A continuación, los números se convierten en grupos de unos y ceros (*cinta rosada, a la derecha*), que contienen por lo común ocho bits cada uno, en vez de los tres de la ilustración.

Mantenimiento correcto de las señales

Es posible que la mayor dificultad que haya de afrontar el ingeniero de un sistema inalámbrico sea la de minimizar las interferencias provocadas por ruidos electromagnéticos y por reflejos de la señal. Dado que las baterías de las unidades móviles han de ser de poco peso, resulta obligado el diseño de sistemas que permitan una recepción clara desde equipos móviles que transmiten con potencias inferiores a medio watt. Y han de conseguirlo aun cuando la señal de radio haya de pasar alrededor de obstáculos. Los usuarios desean utilizar sus equipos dondequiera que se encuentren, lo cual, no pocas veces, ocurre en los desfiladeros delimitados por los grandes edificios del centro de las ciudades.

Las señales de radio reflejadas por los edificios, los vehículos y el propio terreno provocan un fenómeno muy incómodo, conocido por desvanecimiento multitrayecto.

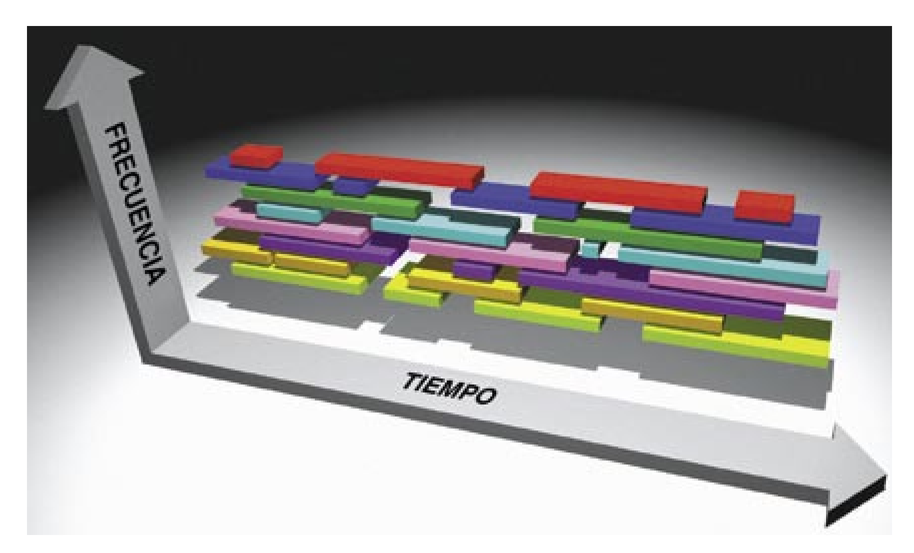


Las señales desviadas o reflejadas pueden mermar la señal principal, a causa de las distintas longitudes de las diversas sendas recorridas por las ondas. Para agravar la situación, el efecto depende de la frecuencia de la señal; varía también al desplazarse el terminal móvil. El desvanecimiento multitrayecto es frecuentemente perceptible en los aparatos de radio de los coches: la señal se pierde y vuelve a aparecer mientras vamos de viaje por la carretera.

Los sistemas de telefonía móvil —también llamada telefonía celular— se fundaban hasta hace poco en técnicas analógicas. Transmitían una señal que variaba de forma continua, como la de una emisora de radio, sea ésta de modulación de amplitud o de frecuencia. En los sistemas digitales modernos, en el transmisor, la señal de voz, que es analógica, se convierte de inmediato en un flujo de bits, o dígitos binarios. Lo más habitual es que se tomen 8000 muestras por segundo de la señal y que cada muestra se convierta en un número binario de ocho dígitos. La correspondiente ristra de 64.000 bits por segundo suele comprimirse; con ello se reduce el número de bits que es preciso enviar. En el receptor, el flujo de bits se reconvierte en la señal sonora original.

Un receptor digital sólo puede interpretar cada dígito binario que llega hasta él como un 1 o como un 0. La inexistencia de situaciones intermedias reduce el riesgo de errores de transmisión. Sin embargo, la multiplicidad de trayectos puede todavía provocar un efecto característico, conocido por dispersión del tiempo de tránsito, a causa del cual los datos quedan "difuminados" en el tiempo. Este tipo de distorsión suele ser el factor limitante de la velocidad máxima de transmisión fiable en un enlace inalámbrico.

De no ser corregidos los bits, los efectos sobre la transmisión de un programa de ordenador o de datos importantes podrían ser catastróficos. Pero la transmisión digital ofrece buenas oportunidades para la supresión de errores. De ordinario, a la secuencia transmitida se añaden



5. LA TECNICA MAS SENCILLA para que una multitud de usuarios (*colores*) puedan comunicarse por ondas de radio consiste en asignar a cada sujeto una frecuencia distinta, procedimiento llamado acceso múltiple por repartición de frecuencia (FDMA). Los receptores están programados para saber qué transmisor opera en cada frecuencia. Sintonizando a diferentes frecuencias —distintas alturas, en la ilustración— podremos separar las señales procedentes de usuarios distintos, como el oyente que sintoniza su emisora preferida en el dial de un receptor. Las señales individuales aparecen representadas mediante tramos intermitentes, pues los canales siempre se utilizan.

cierto número de bits de corrección, que dependen de la identidad de los bits de datos cercanos. El receptor evalúa estos bits especiales, y dado que "conoce" las reglas establecidas para determinarlos, así como los tipos de corrupción de datos que son más probables, con frecuencia consigue enmendar las discrepancias. Con esa técnica podemos rectificar la mayoría de los errores de bits.

Otra de las técnicas digitales utilizadas para combatir el ruido y el desvanecimiento por el efecto multitrayecto, y de uso común en redes locales inalámbricas, es la de espectro disperso. Esta técnica, que suele emplearse en combinación con codificación de corrección de errores, aprovecha la tendencia a variar con la frecuencia que tienen el ruido y el desvanecimiento multitrayecto. Las técnicas de espectro disperso esparcen intencionadamente la señal transmitida sobre una amplia gama de frecuencias de radio. Entonces es casi seguro que el mensaje será recibido merced, por lo menos, a algunas de ellas.

En la técnicas de dispersión de frecuencia conocida por salto de frecuencia, el transmisor conmuta a una frecuencia distinta cada pocos milisegundos. El receptor conoce la secuencia y le sigue el rastro. Incluso aunque algunas de las frecuencias no funcionen, otras lo harán. En el caso de comunicaciones de datos, el receptor puede solicitar retransmisiones de los datos corrompidos, lo que permitirá recomponer el mensaje correcto.

Otra técnica de dispersión de frecuencia es la secuencia directa. Con esta técnica, cada bit de datos se convierte en una serie de varios bits transmitidos (llamados chips). La secuencia de chips tiene aspecto de ser aleatoria, pero le es conocida tanto al transmisor como al receptor. De esta forma, un bit 1 de los datos puede quedar convertido en la secuencia (chip) 000100110101111 y un bit de datos 0 quedar convertido en la secuencia complementaria 111011001010000, que se distingue sin dificultad de la primera. Dado que esta operación genera más bits por segundo de los iniciales, la señal resultante, al transmitirse, se expande sobre una gama de frecuencias más amplia, minimizando la interferencia y el desvanecimiento multitrayecto. El receptor puede entonces reconstruir los datos con gran fidelidad.

Trataré de dar un símil (aunque imperfecto). Una persona dura de oído podría entenderme mal si yo pronunciase la palabra "aleluya". Pero si contrato a un grupo coral para que cante el coro "Aleluya" del *Mesías* de Haendel, es probable que el mensaje sea recibido, por las muchas veces en que la música repite la palabra, a frecuencias que van desde la voz soprano al bajo.

Una voz en la multitud

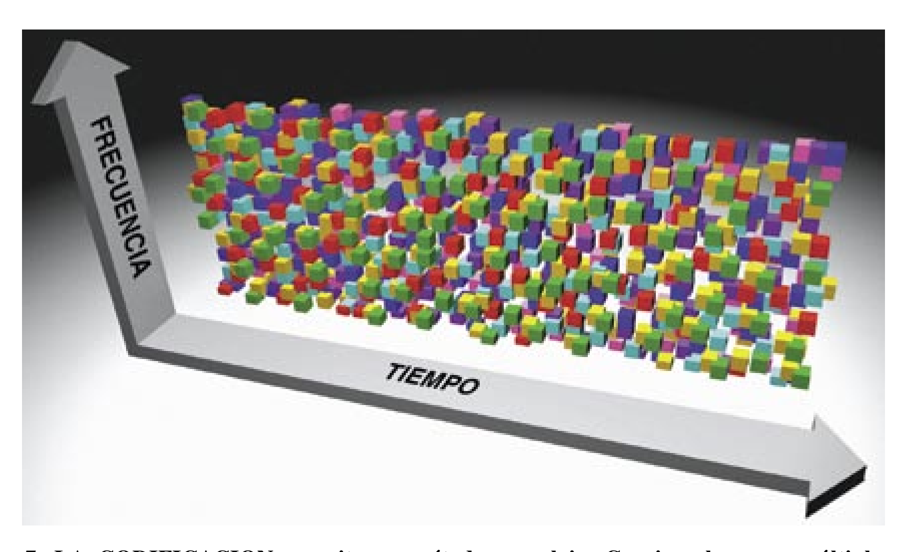
Para el ingeniero de sistemas inalámbricos, casi tan problemático como la eliminación de errores es lograr que sea el mayor número posible de usuarios quienes compartan un bien escaso, el espectro electro-

6. UN SEGUNDO METODO para permitir que muchos usuarios compartan el espectro de radio es el acceso múltiple por repartición de tiempos (TDMA). A cada usuario (*colores*) se le asigna una franja temporal repetitiva, que dura una fracción de milisegundo (*barras verticales*). Los datos de cada usuario, en forma digital, se comprimen en el tiempo y son enviados a alta frecuencia durante la franja temporal que le corresponde. El receptor puede separar las señales porque sabe exactamente cuándo ha de esperar cada una de ellas.



magnético. A tal fin, son muchas las redes inalámbricas que descansan en el principio de reutilización de frecuencias. Los sistemas de telefonía celular, por ejemplo, dividen en subconjuntos la totalidad de los canales de radio disponibles. En la región correspondiente a cada célula, opera sólo uno de los subconjuntos. La separación geográfica entre células que tengan los mismos subconjuntos reduce las interferencias y permite utilizar unas mismas frecuencias en regiones distantes. Los sistemas PCS y los sistemas celulares digitales operan sobre principios parecidos.

La capacidad de una red celular puede incrementarse mediante "microcélulas" de un radio de medio kilómetro o así, en lugar de las "macrocélulas" típicas, que por lo general tienen más de dos kilómetros de radio en las ciudades y pueden ser mucho mayores en las zonas rurales. Aunque su uso no se encuentra aún muy difundido, las microcélulas constituyen una forma atractiva de llevar servicios de telefonía y de transmisión de datos a zonas con servicio insuficiente, de modo especial en regiones densamente pobladas de países en vías de desarrollo.



7. LA CODIFICACION permite un método complejo. Gracias al acceso múltiple por repartición de código (CDMA), muchos usuarios (*colores*) comparten el espectro de radio sin tener que asignárseles frecuencias individuales o franjas de tiempo. La señal de cada usuario es codificada de tal modo que queda "esparcida" por el espectro de radio (*en sentido vertical en la figura*). Esta dispersión asegura que las señales de los diversos usuarios no se destruyan mutuamente. El receptor distingue la algarabía de señales esparcidas individuales porque cada una tiene un código exclusivo.

Son varios los métodos de que se sirven las estaciones base para mantener separadas las señales procedentes de diferentes unidades móviles. La solución tradicional ha consistido en recurrir al acceso múltiple por reparto de frecuencias (FDMA en siglas inglesas), en el cual cada dispositivo móvil envía una frecuencia diferente. La estación base sabe qué equipo móvil está ocupando cada frecuencia y clasifica las señales, de igual manera que nosotros seleccionamos nuestra estación de radio favorita, situando el dial de nuestro aparato en la posición correcta (que corresponde a una frecuencia característica).

Las técnicas digitales posibilitan sistemas en los que muchos usuarios comparten una misma frecuencia. En el acceso múltiple por repartición de tiempos (TDMA, en inglés), que es el sistema preferido por los servicios inalámbricos de AT&T, a cada equipo móvil se le asigna durante cada segundo un intervalo repetitivo de un milisegundo, durante el cual transmite y recibe. La estación base sabe qué móviles están transmitiendo durante cada fracción de tiempo; de este modo puede mantener separadas las distintas señales.

Una técnica rival, puesta en práctica por Qualcomm y utilizada por U.S. West y por Bell Atlantic —acceso múltiple por repartición de código (CDMA, en inglés)— tiene una mecánica un tanto parecida a la dispersión directa de espectro. Pero la secuencia de dispersión que reemplaza a cada bit de datos es mucho más larga: más de 100 chips, en vez de la decena. Además, tal secuencia es peculiar y exclusiva de la estación móvil que la transmite o la recibe. Esta característica permite que múltiples usuarios transmitan al mismo tiempo.

La estación base examina el agregado de señales de espectro disperso entrantes para determinar su correlación con la secuencia de dispersión correspondiente a cada unidad móvil. Muchas compañías de telefonía celular y de PCS han adoptado ahora el acceso múltiple por repartición de código, normalmente, combinado también con acceso múltiple por repartición de frecuencia. Para facilitar la transición a nuevas bandas y a las nuevas técnicas de acceso múltiple, algunos proveedores de sistemas inalámbricos operan simultáneamente con los sistemas antiguo y nuevo, y suministran a sus abonados equipos polivalentes.

Todas estas innovaciones técnicas abren nuevos horizontes a las comunicaciones inalámbricas. En los países en vías de desarrollo, la necesidad más urgente consiste, por lo general, en disponer de servicio telefónico fiable. Este servicio esencial hace más eficaz el comercio y mejora la seguridad y la sanidad, al permitir atender con rapidez las peticiones de ayuda. Las comunicaciones inalámbricas pueden proporcionar el servicio con un mínimo de construcción pesada y con una inversión inicial reducida: las necesidades de capital son menos de la mitad de las requeridas para establecer una red de tendido cableado. Además, una vez instalados, los sistemas inalámbricos pueden adaptarse sin grandes dificultades a la transmisión de datos, si aumenta la demanda.

Estudios realizados por Hung-Yao Yeh y el autor, ambos en la Universidad Carnegie Mellon, indican que los fabricantes de sistemas inalámbricos van a tener que aumentar el número de canales disponibles por medio de sus equipos para extraerles el máximo rendimiento a las capacidades de los sistemas inalámbricos en el mundo no industrializado. Asimismo, hemos llegado a la conclusión de que, dados los beneficios que son de esperar del servicio telefónico, los gobiernos nacionales deberían asignar a los sistemas inalámbricos mayor espacio en el espectro modelo en servicio.

Uno de los avances que con mayor probabilidad incentivarían un uso más generalizado de las redes inalámbricas para las comunicaciones de datos sería que la conmutación entre redes resultase imperceptible. Los usuarios podrían tener entonces acceso ininterrumpido a Internet o a otras redes de datos sin preocuparse de

las peculiaridades del sistema inalámbrico subyacente.

En Carnegie Mellon, Bernard J. Bennington, Charles R. Bartel, Peter W. Bronder y el autor, entre otros, han creado un campo de pruebas para la conmutación imperceptible, en el que intervienen una red inalámbrica de área local y una red de base celular de cobertura metropolitana. Se trata, que sepamos, de la mayor instalación inalámbrica de área local que existe. Funciona con equipos construidos por Lucent Technologies; consta por ahora de más de 100 estaciones base y proporciona servicios de datos a velocidades de 2 megabits por segundo en una extensión que es la mitad del recinto universitario.

Los usuarios, al desplazarse por la universidad, pueden tener acceso a Internet y a otras redes desde ordenadores u otras máquinas portátiles; al hacerlo, las conexiones inalámbricas específicas se gestionan de forma automática. Entre las aplicaciones más populares están la recepción de correo electrónico y el acceso a Internet. El ordenador portátil resulta así tan eficaz como un equipo cableado, de despacho, pero más cómodo de utilizar. Tenemos el propósito de extender el servicio a toda la comunidad del recinto universitario en 1999.

También es posible la utilización en el exterior de las instalaciones, en el área, mucho más extensa, de la región de Pittsburgh, gracias al servicio Cellular Digital Packet Data (CDPD) ofrecido por Bell Atlantic Mobile. Este servicio, sin embargo, funciona sólo a 19,2 kilobits por segundo.

Entre los problemas que tuvimos que afrontar estaba el siguiente: al desplazarse el usuario, su equipo ha de mantener la conexión óptima correspondiente a su ubicación actual y a la tarea que esté realizando. Tal requisito entraña que, en ocasiones, la conexión deba "trasladarse" de una red a otra. Mi colega David B. Johnson ha preparado una batería de programas que permiten la realización de tales traslados de forma imperceptible para el usuario.

Dado que muchos ordenadores funcionan según un modelo cliente-servidor, en el cual es preciso trasladar archivos de datos de unos puntos a otros, en una red inalámbrica el acceso a archivos distribuidos exige atención especial. Los enlaces por radio funcionan a menor velocidad que los enlaces cableados y producen mayor número de bits erróneos. Además, pueden fallar de vez en cuando. El diseño de los sistemas de archivos distribuidos para uso en una red inalámbrica ha de poder asumir tales imperfecciones. Mahadev Satyanarayan, también de Carnegie Mellon, ha estado trabajando en posibles métodos de construcción de tales sistemas de archivos.

Otro colega, Daniel P. Siewiorek, construye los propios ordenadores móviles. Juntamente con sus asociados han ensamblado toda una serie de ordenadores "de indumentaria". Estos dispositivos pueden servir para una variedad de propósitos, desde la navegación, hasta para dar instrucciones a los constructores de aviones. Muchos de los ordenadores "de indumentaria" de Siewiorek (y otros similares) están equipados para sistemas inalámbricos. Abrigamos la esperanza de que en un día no lejano el sueño de una conectividad inalámbrica y ubicua llegue a ser conseguida mediante estas máquinas.

Hemos logrado, pues, materializar nuestra visión de enlazar de modo imperceptible una red inalámbrica de área local con otras redes inalámbricas y de área metropolitana. Un ordenador portátil equipado para ambos sistemas tiene plena libertad de movimiento, manteniendo en todo tiempo una conexión continua. Confiamos en la instalación de sistemas similares en otros lugares. Estos prototipos acabarán enlazados con satélites y con otros sistemas, formando una red inalámbrica de transmisión de datos, cómoda de utilizar y de alcance internacional.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

MOBILE COMPUTING AT CARNEGIE MELLON. Número especial de *IEEE Personal Communications*, vol. 3, n.º 1; febrero de 1996.

USING WIRELESS TECHNOLOGY TO PROVIDE BASIC TELEPHONE SERVICE IN THE DEVELOPING WORLD. Alex Hills y Hung-Yao Yeh en *Telecommunications Policy*, vol. 20, n.º 6, páginas 443-454; julio de 1996.

LOCAL-AREA NETWORKS GO WIRELESS. Ingrid J. Wickelgren en *IEEE Spectrum*, vol. 33, n.º 9, páginas 34-40; septiembre de 1996.

A WIRELESS INFRASTRUCTURE TO SUPPORT RESEARCH ACTIVITIES. Alex Hills y Richard Howey en *Wireless Personal Communications: The Evolution of Personal Communications Systems*. Dirigido por T. S. Rappaport et al. Kluwer Academic Publishers, 1996.

Radio de espectro disperso

Gracias a la partición de la información en segmentos digitales y a su transmisión a baja potencia y a diferentes frecuencias, millones de personas pueden enviar o recibir mensajes en un mismo momento

David R. Hughes y Dewayne Hendricks

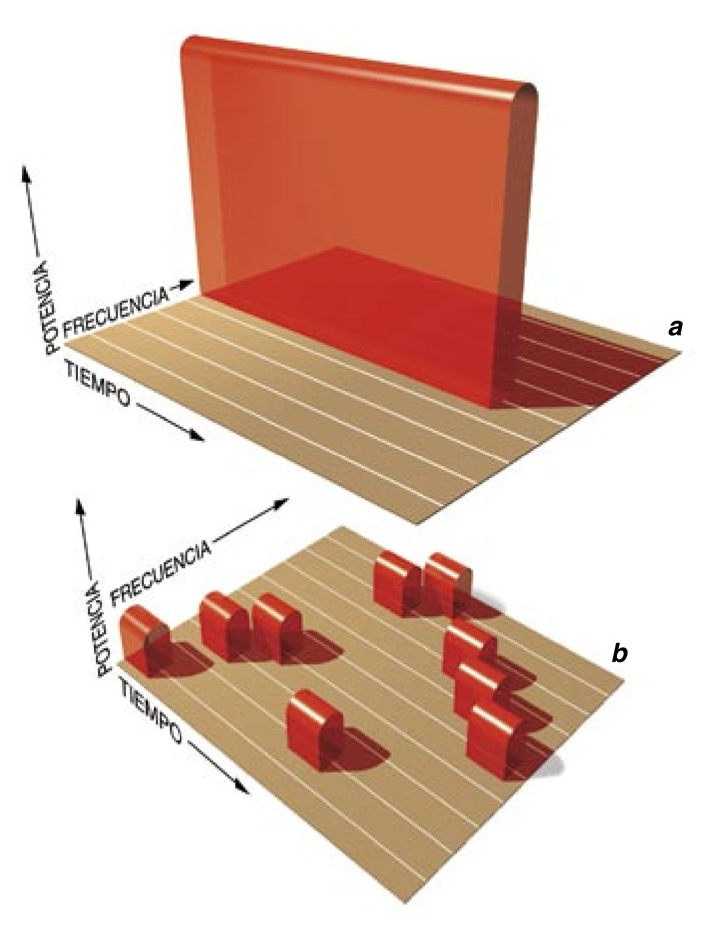
Se dice y se repite que el espacio radioeléctrico es un recurso valioso y escaso, que hay que racionar como el agua en el desierto. Esta idea asentada procede de los transmisores y receptores tradicionales, cuyo funcionamiento debe restringirse a franjas estrechas y especializadas del espectro electromagnético para minimizar las interferencias. Por ello, los gobiernos manejan los canales de radio repartiendo licencias como si se tratara de parcelas de una urbanización. En algunos países suele recurrirse a licitaciones y subastas para asignar bandas de frecuencia con distintos fines: emisiones comerciales de radio y televisión, transmisiones militares y policiales, servidores de taxis, comunicaciones en banda C, radioaficionados y usuarios de teléfonos celulares.

Pero el avance en las comunicaciones digitales ha franqueado la entrada de un modelo nuevo. Los transmisores pueden hacer uso de las técnicas de espectro disperso para compartir canales sin entrar en conflicto unos con otros. La información puede segmentarse en haces de unos y ceros que después se radiotransmiten, enviándose cada paquete a baja potencia a través de distintos canales, o frecuencias. En principio, dentro de una misma zona metropolitana podrían funcionar en la misma banda de frecuencias millones de transmisores a la vez que movieran centenares de megabits por segundo.

Este uso compartido del espectro plantea un desafío a las prácticas tradicionales. En el pasado, al asignar las estrechas bandas de frecuencias comerciales, el gobierno concedía las licencias a empresas, tales como las que ofrecen teléfonos celulares y servicios de comunicaciones personales. Las empresas cobran a los usuarios los servicios ofrecidos, lo mismo que la compañía telefónica factura a sus abonados. En el nuevo modelo económico, sobra el intermediario. Los usuarios pueden comunicarse directamente unos con otros y sin cargo, aunque estén separados kilómetros y miríadas de otras personas estén utilizando los mismos canales de radio. Este cambio esencial ha causado la revisión de las prácticas normativas de los gobiernos, que ya han designado ciertas bandas de frecuencia para uso libre de radios de espectro disperso.

¿En qué se basa esta revolución técnica? La radiodifusión tradicional trabajaba transmitiendo la información a gran potencia a través de una banda de frecuencias estrecha. Al operar en una porción minúscula del espectro electromagnético, cada transmisor dejaba sitio para que otros funcionaran sin interferencias en las frecuencias vecinas. Pero los ingenieros se han dado cuenta de que resulta más rentable transmitir la información por un método diametralmente opuesto, a saber, dispersando a baja potencia la información a través de un fracción menos enteca del espectro.

No le resulta fácil a la intuición entender la ventaja: ver que la técnica facilita repartir mejor el pastel del espectro permitiendo que un número casi ilimitado de individuos se lleve un mordisquito apenas visible. Aunque las radios de espectro disperso usan más ancho de banda del necesario, evitan las interferencias al efectuar las transmisiones a una potencia mínima y sólo con



1. LAS RADIOSEÑALES (*en rojo*) se han transmitido tradicionalmente a gran potencia y en modo continuo a lo largo de una banda de frecuencias (*a*), estrecha y solitaria. Los ingenieros saben hoy extraer un mayor rendimiento del espectro de radio repartiendo cada señal entre distintos canales, tal como muestra la técnica de saltos de frecuencia (*b*).

Los improbables inventores de la radio de salto de frecuencias

Era hermosa, encantadora y de talento. Le atraía el poder de la técnica. En 1941 la actriz Hedy Lamarr, junto con el compositor y músico vanguardista George Antheil, presentaron una solicitud de patente para un "Sistema de comunicación secreto", un dispositivo que pretendía facilitar al ejército norteamericano un sistema de guía de torpedos mediante unas radioseñales que saltarían continuamente de una a otra frecuencia, dificultando así la interceptación y las interferencias del enemigo.

Se llamaba Hedwig Maria Eva Kiesler y había nacido en Viena. Lamarr acaso tuviera la inspiración del "salto de frecuencias" en su etapa de esposa de Fritz Mandl, fabricante de armamento que vendía municiones a Adolf Hitler. A través de un matrimonio arreglado por sus padres, Lamarr era el trofeo lucido por Mandl a quien acompañaba en las numerosas comidas y reuniones de negocios, donde se familiarizó en silencio con la técnica militar del Eje. Tras cuatro años con Mandl, Lamarr, antinazi acérrima, huyó a Londres, donde conoció a Louis B. Mayer de la MGM, quien la "descubrió" y la convenció de que se trasladara a EE.UU.

En Hollywood encontró a Antheil, quien la ayudó a comprender el modo de sincronizar el salto de frecuencias entre el radiotransmisor y el radiorreceptor. Su invento requería dos rollos de papel, similares a los de las pianolas, taladrados por una misma distribución aleatoria de orificios. Uno de los rollos controlaría el transmisor a bordo del submarino mientras que el otro acompañaría al receptor montado en el torpedo. Aunque ingenioso, el sistema se consideró excesivamente abultado para ser empleado en la guerra.

Sin embargo, la idea germinal de salto de frecuencias persistió. A finales de los cincuenta los contratistas de la armada estadounidense pudieron aprovechar los primeros procesadores de ordenador para controlar y sincronizar la secuencia de los saltos. Desde entonces, las fuerzas armadas de EE.UU. han desarrollado técnicas más refinadas con unos procesadores cada vez más rápidos para unos equipos caros y clasificados, incluidos sistemas de comunicaciones por satélite. *—D.R.H.*

HEDY LAMARR fue cobeneficiaria de una patente (*que se ilustra*) de una técnica de uso generalizado en teléfonos celulares y servicios de comunicaciones personales.

fragmentos de información en cada frecuencia de las usadas. Son tan débiles las señales emitidas, que podrían resultar casi imperceptibles sobre el ruido de fondo, lo que supone un beneficio añadido de la dispersión de espectro: los otros receptores encuentran grandes dificultades para escuchar indiscretamente la transmisión. En la práctica, el receptor deseado pudiera ser el único que conociera la transmisión en curso.

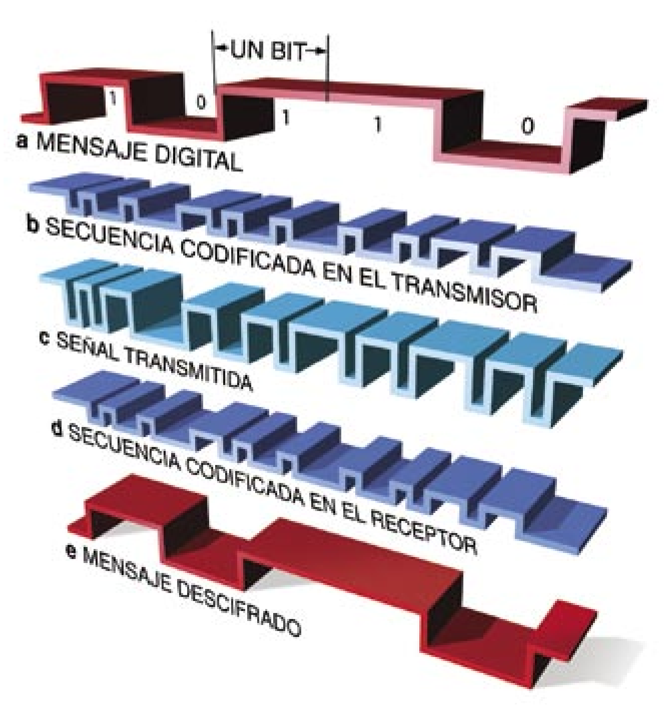
En un comienzo, el principal atractivo del espectro disperso residía en su naturaleza furtiva. Durante la Segunda Guerra Mundial el ejército norteamericano se interesó por un intrigante dispositivo que había copatentado la actriz Hedy Lamarr. La idea era harto elemental: en vez de transmitir la información por un solo canal, con el que el enemigo podría tropezar durante una transmisión, el aparato mudaba de canal continuamente, transmitiendo una pizca de información aquí y otra pizca allá, de acuerdo con un código secreto conocido sólo por el transmisor y el receptor deseado. Esos saltos de frecuencia incesantes impedirían que el enemigo distinguiera la información del ruido circundante. Pero el aparato de la Lamarr se desechó por inviable.

Mas el progreso ulterior en electrónica de circuitos posibilitó la factibilidad de la dispersión en el espectro. Los microcircuitos de semiconductores, henchidos de miles de transistores, están capacitados para emitir paquetes de datos digitales según un patrón aparentemente aleatorio por un gran número de canales. El receptor, diseñado para captar las señales de acuerdo con la secuencia exacta y privativa de la radio emisora, reordena los fragmentos de información procedentes de las distintas frecuencias. Además, cuando el receptor echa en falta un paquete o topa con uno corrompido puede avisar a la fuente emisora para que vuelva a enviarlos. Además, puede emplearse la corrección anticipada de errores, técnica que refuerza la posibilidad de que los datos se reciban bien a la primera.

Con las técnicas electrónicas nos ha llegado otro método de espectro disperso. En la secuencia directa, la información transmitida se mezcla con una señal codificada que, para un oyente ajeno, suena a ruido. En esta opción alternativa al salto de frecuencias, cada bit de datos se envía simultáneamente en varias frecuencias, desde luego con el transmisor y el receptor ambos sincronizados a la misma secuencia codificada.

DAVID R. HUGHES Y DEWAYNE HENDRICKS colaboraron en la reciente instalación de radios de espectro disperso en Ulan Bator, para poner en contacto ocho centros científicos y educativos de esa ciudad mongola.

En fechas más cercanas, ulteriores avances en la técnica de los microcircuitos han producido procesadores de señales capaces de machacar datos a velocidad de vértigo; de bajo consumo, son, además, bastante baratos. El perfeccionamiento de los equipos abre el camino a técnicas de espectro disperso más refinadas, incluidas algunas híbridas que conjugan las características mejores del salto de frecuencia y de la secuencia directa, así como otros procedimientos de cifrar la información. Los nuevos procedimientos oponen tenaz resistencia a las interferencias, a los parásitos y al efecto eco o fantasma; en virtud de ese efecto, que depende de la frecuencia, cuando una señal se refleja en los edificios, la tierra y diferentes capas atmosféricas, se introducen unos retrasos en la transmisión que pueden confundir al receptor.



2. LA SECUENCIA DIRECTA es otra técnica para repartir una señal a baja potencia entre el espectro de radio. Un mensaje digital de "10110" (*a*) se mezcla con una secuencia codificada (*b*). A continuación, la señal resultante se transmite de modo tal, que cada bit del original se envía varias veces con una frecuencia distinta. Esta redundancia aumenta las posibilidades de que el mensaje pase incluso en zonas urbanas muy pobladas, donde las interferencias son un problema. Luego, el receptor emplea la misma secuencia codificada (*d*) para descifrar la transmisión y obtener el mensaje digital original (*e*).

En 1985, el ente federal norteamericano de comunicaciones (la CFC) permitió por fin el uso público de radios de espectro disperso, aunque con algunas restricciones. Según las normas de la CFC, las radios deben trabajar en bandas industriales, científicas y médicas. Se prohíbe que las radios funcionen a más de un watt y es obligado que las transmisiones dispersen cierto mínimo de un extremo a otro del espectro concedido.

Puesto que no ha comenzado todavía la fabricación industrial, los productos de espectro disperso para transmisión de información facilitados por los 60 distribuidores actuales llevan tales precios en las etiquetas que limitan esa técnica a organizaciones financieras, escuelas y bibliotecas. Hoy una radio capaz de manejar un tráfico casi como el de Ethernet (10 megabits por segundo, adecuado para comunicaciones por ordenador de gran velocidad) hasta una distancia de unos 40 kilómetros cuesta millón y medio de pesetas. Aparatos de menos prestaciones, que funcionen a velocidades T1 (1,5 megabits por segundo) con un alcance de unos 25 kilómetros, cuestan 225.000 pesetas. Para alcances muy cortos, como sería en las comunicaciones internas de un edificio, las tarjetas de red local inalámbrica para ordenadores personales cuestan sólo 38.000 pesetas.

Hay todas las razones para creer que esos precios bajarán conforme crezcan los volúmenes de fabricación para hacer frente a las crecientes demandas del mercado de más ancho de banda y conexiones inalámbricas seguras de los ordenadores personales a Internet. Quizá en el futuro sea corriente disponer de un transmisor inalámbrico para llegar a un sistema central conectado a un circuito clásico de líneas instaladas en tierra. No tardaremos mucho en poder comprobar cómo por unas 75.000 pesetas tendremos una buena radio que funcione a velocidades T1 o superiores con un alcance de más de 30 kilómetros.

¿Hacia dónde se encamina esta técnica? Transmisores y receptores son casi del todo digitales. Esa tendencia, combinada con el rápido desarrollo de sistemas inalámbricos de base celular, abrirá una amplia gama de servicios relacionados con el espectro disperso. Esos servicios funcionarán merced a redes inteligentes con transceptores "inteligentes" y conmutadores. Tales dispositivos sabrían, por ejemplo, cuál de las diversas técnicas de espectro disperso emplear en cada situación para garantizar la transmisión fiel de toda la información. Estas nuevas redes necesitarán cada vez más un complejo diverso de conexiones y conmutadores, algunos instalados en tierra, propiedad de entidades diversas.

Internet representa hoy el mejor ejemplo de mecanismo autorregulado necesario para el nuevo entorno de la radiodifusión. La creación de una nueva estructura descentralizada similar para optimizar el reparto compartido del espectro radioeléctrico requerirá un notable esfuerzo; en él habrán de empeñarse expertos en telecomunicaciones y empresarios que trabajan con distintas reglamentaciones mundiales. Creemos que el despliegue y el crecimiento de ese sistema son alcanzables mediante una electrónica cada vez más "inteligente" e imaginamos un conjunto de protocolos autónomos incorporados en esos dispositivos inteligentes. Con la multiplicación de fuentes emisoras avanzadas, la sociedad deberá abordar la incorporación de incentivos, positivos y negativos, en el seno de la misma infraestructura de la red al objeto de que se haga el mejor uso de un recurso común compartido: el espectro radioeléctrico.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

SPREAD SPECTRUM COMMUNICATIONS HANDBOOK. Segunda edición revisada. M. K. Simon, J. K. Omura, R. A. Scholtz y B. K. Levitt, McGraw-Hill, 1994.

A CHANNEL ACCESS SCHEME FOR LARGE DENSE PACKET RADIO NETWORKS. Tim J. Shepard en *Proceedings of ACM SIGNOMM'S*. ACM, 1996.

Las siguientes páginas Web contienen informaciones de referencia: http://olt.et.tudelft.nl/~glas/ssc/techn/techniques.html; http://www.eff.org/ pub/GII_NII/Wireless_cellular_radio/false_scarcity_baran_cngn94.transcript; y http://wireless.oldcolo.com.

Más allá de los sistemas de voz inalámbricos

Los teléfonos celulares son una aplicación de las comunicaciones inalámbricas. La técnica permite determinar la posición con exactitud y controlar lugares remotos

Warren L. Stutzman y Carl B. Dietrich, Jr.

En los próximos decenios, la red de sistemas de radio terrestres e instalados a bordo de satélites, cada vez más integrada, se irá desarrollando para enfrentarse a la creciente demanda de comunicaciones rápidas y móviles. Aunque el estímulo inicial para la construcción de esa infraestructura vino del simple deseo de conversar sin la sujeción de unos hilos conductores, están surgiendo otras aplicaciones; por citar dos: determinar dónde se encuentra una persona o un objeto y controlar ingenios a distancia.

Hasta hace poco, tales usos podrían haber parecido de interés sólo para navegantes, pilotos, vigilantes o especialistas. Pero la técnica inalámbrica es tan versátil (y los sistemas tan compactos y económicos gracias a los avances en electrónica e informática), que resulta útil incluso para quehaceres más prosaicos, por ejemplo, atravesar la ciudad en automóvil o proteger un domicilio de los ladrones.

Años atrás las únicas ayudas a la navegación eran las estrellas y unos sistemas basados en giróscopos. Más tarde se emplearon radiotransmisores instalados en tierra, como los de la red LORAN ("LOng RAnge Navigation", o Navegación de Gran Autonomía), para determinar la posición, pero esos sistemas adolecen de alcance insuficiente y no informan acerca de la altitud. Hoy, gracias a los satélites, podemos determinar las coordenadas tridimensionales de nuestra situación con una precisión asombrosa.

Quizás el más conocido sea el Sistema de Posicionamiento Global, o GPS (del inglés, "Global Positioning System"), integrado por 24 satélites, que giran alrededor de la Tierra a una altitud superior a los 20.000 kilómetros en seis planos orbitales. Los satélites emiten incesantemente señales que pueden "oírse" desde cualquier punto del globo. Midiendo cuándo llegan las emisiones digitales cronometradas procedentes de al menos cuatro satélites (que indican la distancias a que éstos se hallan), al receptor le basta con aplicar la trigonometría para situarse con un margen de 18 metros. La precisión puede mejorarse hasta menos de un metro sobre una zona específica si un transmisor instalado en un lugar fijo conocido proporciona una información adicional para afinar los cálculos.

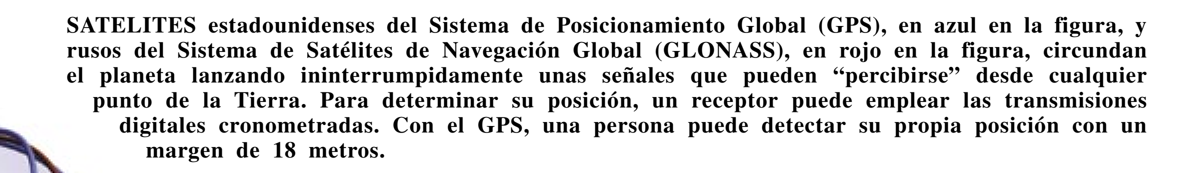
La aplicación más espectacular del GPS se dio en la guerra del Golfo Pérsico, cuando las tropas confiaron a esta técnica su orientación por el desierto iraquí. Desde entonces, el uso comercial del GPS se ha generalizado a pasos agigantados en navegación, topografía y servicios de inspección, especialmente en zonas remotas. Hoy, su incorporación en el coche facilita hallar la dirección exacta. De un uso parecido pueden beneficiarse los excursionistas con prototipos manuales.

Puesto que el GPS ofrece información posicional en tres dimensiones, los aviones pueden emplearlo para seguir rumbos directos, evitando las rutas de tráfico denso entre radiofaros terrestres. Además, su excepcional precisión puede que algún día convierta en innecesarios los complicados y caros radares de seguimiento terrestres.

El GPS tiene su réplica en el sistema ruso de satélites de navegación global (GLONASS). En 1995 entró en servicio el último de los satélites del GLONASS, con el que se completaba la flota de 24 unidades. Desde entonces, sin embargo, algunos han dejado de funcionar. Para finales de este año hay programado el lanzamiento de al menos nueve satélites más.

Cuando el GLONASS opere a pleno rendimiento, aumentarán de forma significativa las prestaciones de los receptores que admitan señales del GPS y rusas. La mejora se notará sobre todo en los "desfiladeros urbanos", zonas céntricas donde la altura de los edificios y otros obstáculos ciudadanos entorpecen las emisiones

WARREN L. STUTZMAN Y CARL B. DIETRICH, Jr., pertenecen al centro para las telecomunicaciones inalámbricas del Instituto Politécnico de Virginia. Stutzman dirige allí el grupo de comunicaciones por satélite, mientras que Dietrich realiza investigación de posgrado.



SATELITES estadounidenses del Sistema de Posicionamiento Global (GPS), en azul en la figura, y rusos del Sistema de Satélites de Navegación Global (GLONASS), en rojo en la figura, circundan el planeta lanzando ininterrumpidamente unas señales que pueden "percibirse" desde cualquier punto de la Tierra. Para determinar su posición, un receptor puede emplear las transmisiones digitales cronometradas. Con el GPS, una persona puede detectar su propia posición con un margen de 18 metros.

de los satélites. El propuesto sistema de satélites de navegación europeo (ENSS), que cubrirá Europa y Africa con 15 satélites, podría refinar aún más la precisión en la determinación de posiciones en esas áreas. Si bien otros servicios modernos, terrestres o por satélites, proporcionan también información posicional, cobran una tarifa y ninguno es tan preciso. No obstante, pese a sus posibilidades, el GPS y sistemas similares tienen su talón de Aquiles en la falta de vía de retorno. Una persona con un terminal de GPS portátil sabe dónde está, pero no lo sabe nadie más. Por ello, muchas aplicaciones requieren que el usuario disponga de un transmisor separado.

La posición puede asimismo establecerse mediante el servicio por satélite de determinación remota (RDSS), que a menudo se emplea combinado con mensajería bidireccional. El RDSS se basa en los mismos principios que el GPS, aunque operando a la inversa: un transmisor en tierra envía una señal que luego reciben dos o más satélites del sistema. Midiendo los distintos instantes en que llegan las señales (indicación de las distancias recorridas por la transmisión), la geometría permite al RDSS calcular la posición de la radio terrestre. Una aplicación actual del RDSS, ideada para gestionar una flota de camiones, puede determinar la posición de un transmisor en tierra con un margen de 0,3 kilómetros.

Los servicios del futuro contarán con buscador bidireccional. El usuario portará un receptor de señales requeridas a través de un satélite de órbita baja. El buscador (barato) contestará entonces, a través del satélite, a una emisora en tierra que determinará la posición del buscador. Esta técnica podría emplearse para controlar el paradero de enfermos de Alzheimer o niños pequeños.

Las redes inalámbricas terrestres pueden, asimismo, manejar transferencias de datos para varias tareas de control remoto. Servicios innovadores recientes aprovechan los canales de mando y voz desocupados para transmitir mensajes, tales como el gobierno de un contador equipado de un transmisor para informar de las lecturas. El contador contesta con una corta descarga de mensajes a un centro de servicio conectado al sistema celular. Otra aplicación se encuentra en las máquinas expendedoras que envían un mensaje cuando las existencias de los productos están bajas y ahorran así visitas inútiles a los distribuidores. Una aplicación diferente podría emitir una alarma con la localización de un vagón de ferrocarril o un camión cuyo sistema de refrigeración se haya averiado y poder salvar con ello las mercancías perecederas.

La técnica inalámbrica ha sido una bendición para la vida humana y otros intereses en lugares apartados. Cierta compañía petrolífera está ensayando un sistema de tipo celular para comprobar la corrosión en gasoductos y oleoductos en zonas remotas. Las autoridades del Monumento Nacional del Valle de la Muerte se apoyan en una red de satélites para controlar el nivel del agua en la laguna de Devil's Hole en Ash Meadows, único lugar conocido donde viven especies amenazadas de ciprinodontos del desierto.

La aplicación de la técnica en sistemas de alarma no sólo frustra la acción de los ladrones, sino también, y en ello reside su extremo interés, previene catástrofes. En el futuro un dispositivo regulará los cruces ferroviarios, emitiendo una señal de alerta cuando la instalación falle. Entonces un capataz podrá enviar un equipo de obreros a reparar la avería.

En algunos lugares de EE.UU. el servicio de emergencia de la policía ha mejorado con la pronta respuesta a su llamada, por más que la persona en apuros no sea capaz de decir en qué lugar se encuentra. Pronto los sistemas de comunicaciones personales y celulares podrán dar también el número de teléfono del abonado que llama y, algo más tarde, localizar al usuario con un margen de 125 metros dos de cada tres veces. Para evitar la inversión de dotar a todos los teléfonos con un receptor GPS, se está desarrollando una técnica de localización posicional basada en tierra.

Los sistemas inalámbricos futuros para la determinación de posiciones y monitorización remota seguirán requiriendo ingenio y creatividad a sus diseñadores. Las aplicaciones hoy en uso no son sino el comienzo.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

INTRODUCTION TO SATELLITE NAVIGATION. Walter F. Blanchard en *International Journal of Satellite Communications*, vol. 12, n.º 5, págs. 421-426; septiembre-octubre 1994.

AN OVERVIEW OF THE CHALLENGES AND PROGRESS IN MEETING THE E-911 REQUIREMENT FOR LOCATION SERVICE. J. H. Reed, K. J. Krizman, B. D. Woerner y T. S. Rappaport en *IEEE Communications* (en prensa).

TALLER Y LABORATORIO

Shawn Carlson

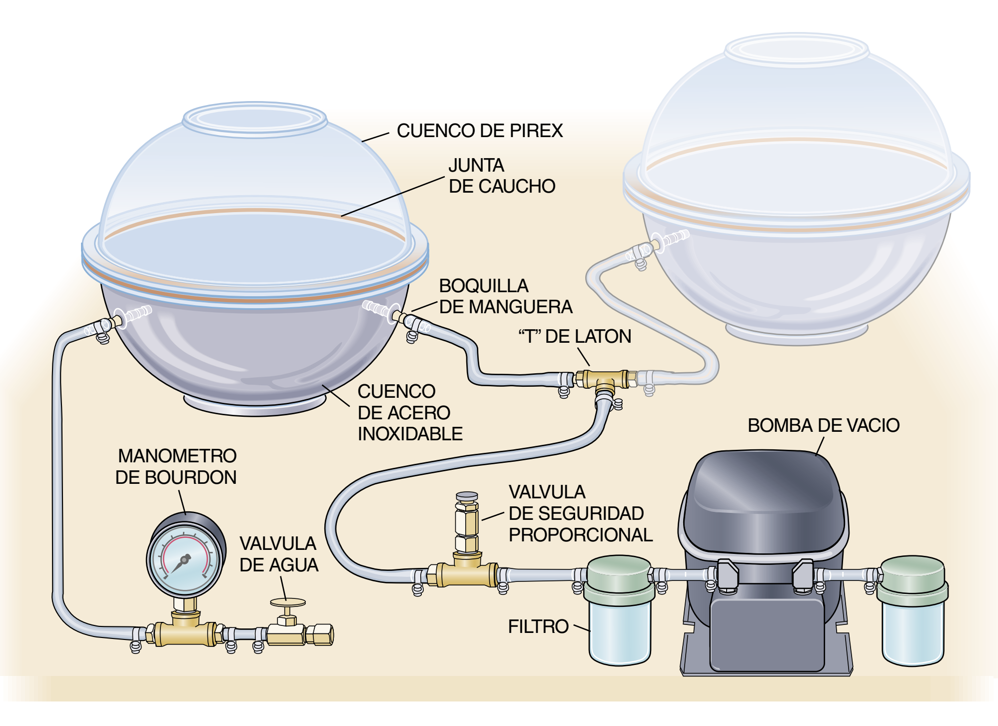
Experimentos con aire tenue

Todos los seres de la Tierra viven bajo el cálido, nutritivo y protector manto de la atmósfera. Pero ese aire se dedica a algo más que a atrapar el calor solar y a trasegar gases entre plantas y animales. También oprime al mundo que tiene debajo con una fuerza poderosa. A nivel del mar, una simple hoja de escribir, si se extiende horizontal, soporta 6111 newtons: 623 kilogramos fuerza.

Alguien podría temer que tal carga oprimiría asfixiantemente a los organismos. Todo lo contrario, el peso de la atmósfera resulta imprescindible para la vida. Sobre el planeta no podría haber agua líquida si la presión atmosférica no fuese suficiente para impedir que se vaporizara en pocos instantes. Numerosos procesos biológicos, en especial la respiración celular, se debilitan si la presión atmosférica se relaja en demasía.

La presión atmosférica disminuye con la altitud. Es algo extraordinario que los humanos se adapten a casi cualquier altura de la Tierra; muy pocas especies hay capaces de desarrollarse lo mismo en las orillas del océano que en los altos del Himalaya, a unos seis kilómetros por encima del nivel del mar. Los humanos se las ingenian para mantenerse calientes y alimentarse incluso en los entornos más fríos y hostiles. Pero nuestra adaptabilidad podría resultar también de un proceso evolutivo: cuando nuestros ancestros nómadas atravesaban las cordilleras, o se adaptaban a las bajas presiones o morían en el camino. ¿Pueden también adaptarse las plantas y otros organismos sin pasado nómada?

Gracias a Stephen P. Hansen, experto de Amherst en vacío, los aficionados pueden sondear esos misterios. Numerosos entusiastas ya conocen a Hansen a través de *Bell Jar* ("La Campana de Vidrio"), su revista trimestral dedicada a la experimentación amateur con técnicas del vacío. Inspirándose en un artículo aparecido en el ejemplar de *Scientific American* de septiembre de 1965, donde se describía una cámara de baja presión construida a partir de un bidón de acero de 113 litros, ha desarrollado una versión reducida y barata de aquel aparato, ideal para investigaciones con bacterias, insectos o pequeñas plantas.



Cuencos de mezclar de vidrio y metal unidos a una bomba de vacío componen una cámara de baja presión esférica

El aparato de Hansen se compone de un cuenco de mezclar de acero inoxidable y otro de pírex. El cuenco de pírex constituye una perfecta tapa transparente para la cámara y el fondo de acero inoxidable permite instalar orificios de vacío y sensores eléctricos.

El cierre estanco se forma comprimiendo los cuencos borde frente a borde contra una junta recortada de una hoja de caucho fina. Hansen compró el cuenco metálico de 30,5 cm en United States Plastics Corporation (800-537.97.24 o 419-228.22. 42; número de catálogo 84104). En la ferretería de su barrio adquirió una hoja de caucho fina. El cuenco de pírex de la medida adecuada puede hallarse en la tienda de cacharros de cocina. Taladremos sendos orificios en costados opuestos del cuenco de acero; fijemos con epoxi una boquilla de manguera de latón de cinco milímetros. Estos accesorios los venden ferreterías y tiendas de sanitarios.

Aunque casi cualquier bomba de vacío drenará perfectamente el aire, el precio de la mayoría de los modelos succiona también el bolsillo. Pero si limitamos nuestras investigaciones a las condiciones terrestres (presiones no menores que en la cima del Everest) nos las arreglaremos con un modelo económico. Hansen empleó una bomba de paletas secas que adquirió por 42,50 dólares en C&H Sales, en Pasadena (California, 800-325.94.65 o 626-796.26.28; número de catálogo PC9703). Unos conductos de vinilo de calidad normal, sujetos con abrazaderas de acero para manguera, nos bastan.

Para experimentos limitados a simular altitudes no superiores a los 4600 metros, lo mejor es un altímetro de bolsillo. Edmund Scientific,

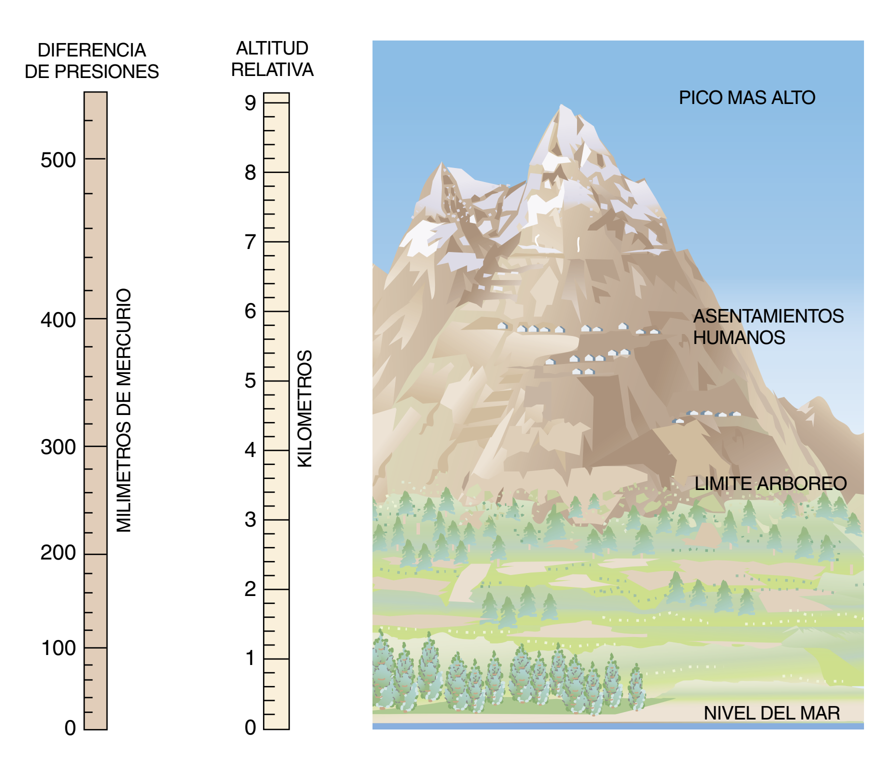
de Barrington (New Jersey, 800-728.69.99 o 609-547.34.88), vende uno con ajuste de cero por 34,95 dólares (número de catálogo 34544). Basta introducir el altímetro en la cámara y leer la altura equivalente en la escala vista a través del pírex. Para imitar altitudes mayores, habrá que conectar un vacuómetro; sirve un manómetro de Bourdon. Estos instrumentos, que se pueden comprar en una tienda de autoaccesorios, dan las medidas en milímetros de mercurio. En la ilustración se muestra la correspondencia con la altitud.

Mayor dificultad reviste cómo regular la presión en la cámara. Podemos instalar un sensor electrónico y un circuito de control que active la bomba, siempre que la presión suba por encima de un valor prefijado. Pero ese dispositivo, de construcción difícil, cuesta muy caro en el comercio.

Hansen descubrió una solución barata con una válvula de seguridad. Se decidió por el modelo VR25, fabricada por Control Devices, de St. Louis (Montana). (Puede comprarse en W. W. Grainger: 773-586.02.44; número de catálogo 5Z-763.) La bomba de vacío extrae aire de la cámara y la válvula permite el paso al interior de un débil flujo de aire. Esta fuga ajustable impide que toda la fuerza originada por el vacío actúe sobre la cámara, haciendo que la presión interna se mantenga más alta de lo que estaría de otro modo. La válvula de aguja deja pasar una corriente de aire, pequeña aunque constante, que arrastra al exterior los gases generados por los organismos del interior.

Resulta un poco arduo ajustar la válvula de seguridad a una presión concreta. Una vez ajustada, la válvula mantendrá fielmente ese nivel. Con todo, la bomba de vacío hay que mantenerla en incesante operación. Téngase en cuenta que, si la presión atmosférica exterior sube o baja, la presión dentro de la cámara hará lo propio.

Para ciertos experimentos biológicos habrá que variar los niveles de temperatura y luz. Pongamos la cámara en un alféizar, apoyando el cuenco de metal en una almohadilla eléctrica o sumergiéndolo en un cubo con agua helada. Para ajustes más precisos, situemos la cámara bajo una luz de espectro completo controlada por un temporizador y hagamos un foco calorífico de un termostato. Tras pugnar durante años con termostatos caseros me di por vencido y terminé por comprar unos a Omega Engineering, de Stamford (Connecticut; 800-826.63.42 o 203-359.16.60; número de catálogo CN8590).



La altitud simulada por la cámara por encima de su altura verdadera se determina mediante la lectura en un vacuómetro

Si optamos por ese camino, habrá que comprar unos ocho metros de conductor termopárico de tipo T (el número de catálogo de Omega es PR-T-24SLE-25). Cortemos un trozo de ese cable doble —de cobre y constantán— lo bastante largo para que llegue desde el controlador al interior de la cámara. Pelemos unos dos o tres centímetros de ambos cables en un extremo y unamos por torsión los alambres pelados. Una vez entrelazados, se generará una minúscula tensión eléctrica en función de la temperatura de los cables. Engarcemos los otros extremos de los cables en el controlador.

Hay que introducir los cables del termopar (y cualesquiera otros que se necesiten) en la cámara sin que ésta pierda estanqueidad. Para ello va muy bien otra boquilla de manguera. Tras pasar los cables por su interior, se fijan llenando el tubo de epoxi. Una vez seca ésta, el conjunto se instala atravesando el cuenco de acero del mismo modo que antes.

El controlador que yo empleé puede dar un máximo de 120 ampères a 120 volts de corriente alterna; su potencia de salida está, pues, limitada a 600 watts. Omega vende calentadores adecuados, pero podríamos recubrir los costados del cuenco de acero con una espuma aislante rociable y apoyar el fondo metálico no cubierto sobre una pequeña placa caliente, tal como la que sirve para mantenernos caliente el café.

Podría resultar útil construir dos cámaras iguales y unirlas mediante un adaptador en T. Esa duplicidad permite simultanear dos experimentos, empleando una cámara para los ensayos y la otra de control. A veces, puede que la segunda cámara la tengamos a la presión atmosférica. Pero si se desea variar sólo el nivel de temperatura o el de luz, esa disposición permite mantener en las dos cámaras la misma baja presión. Valdría la pena intentar cultivar plantas tropicales en altitudes alpinas o comprobar si una mosca se cansa antes en aire tenue. Con un poco de imaginación, este pasatiempo es inacabable.

Los aficionados a experimentos relacionados con el vacío pueden suscribirse a Bell Jar. *Envíe un cheque o un giro postal por veinte dólares a* Bell Jar, *35 Windsor Drive, Amherst, NH 03031. Para más información acerca de este y otros proyectos científicos, visite la sección Forum de la Society for Amateur Scientists en la página World Wide Web de www.thesphere.com/SAS/. Puede también escribirse a la sociedad a 4735 Clairemont Square, Suite 179, San Diego CA 92117 o llamar al 619-239.88.07.*

Ian Stewart

La ley de promedios, derogada

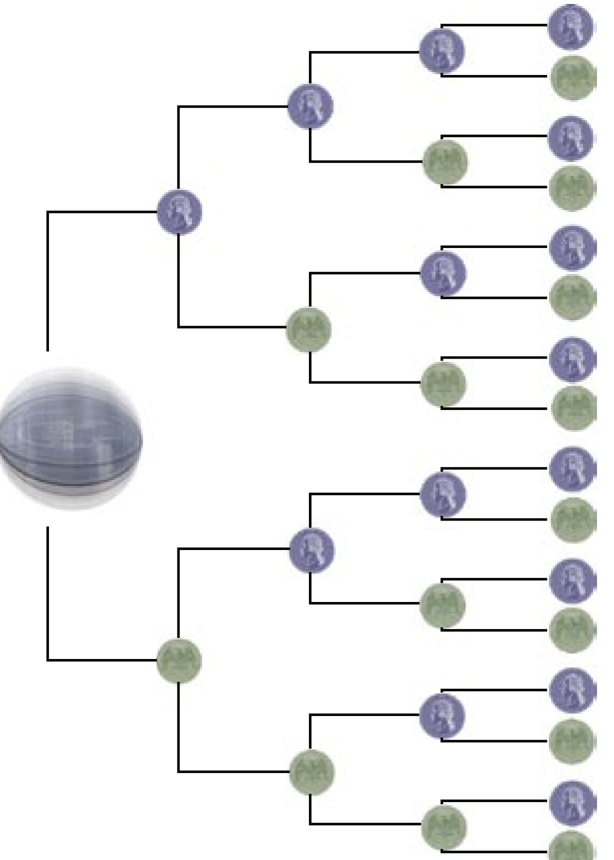
Imaginemos que lanzo repetidamente una moneda sin sesgo, donde cara y cruz sean igual de verosímiles; es decir, que tengan una y otra la misma probabilidad, $^1/_2$. En el lance, voy llevando la cuenta de las veces que aparece cada uno de estos dos posibles resultados. Supongamos que en cierto momento el recuento indique que han salido 100 caras más que cruces. ¿No tendría que haber una tendencia de las cruces a compensar esa ventaja en futuros lanzamientos? Hay quienes hablan de una ley de promedios, basada en la presunción de que los lanzamientos de una moneda insesgada deberían acabar por igualarse. Otras personas opinan, en cambio, que las monedas "carecen de memoria", con lo que la probabilidad de cara y cruz se mantiene siempre constante e igual a $^1/_2$, y sacan la conclusión de que no habrá futura tendencia al empate.

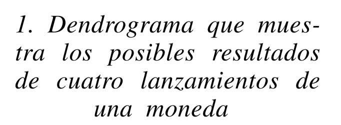
La misma cuestión se presenta en otras circunstancias. Si por término medio se produce una catástrofe aérea cada cuatro meses, y ya han transcurrido tres meses sin novedad, ¿cabe esperar que pronto habrá de ocurrir alguna?

En todos los casos de este jaez, la respuesta es negativa. Los procesos aleatorios correspondientes —o, con mayor precisión, los modelos matemáticos clásicos que describen tales procesos— carecen, como se ha dicho, de memoria.

Empero, mucho depende de lo que se entienda por "conseguir el empate". Una prolongada serie de "caras" no afecta a la probabilidad de que salga "cruz" más adelante. Aun así, al cabo de una tanda de 100 caras más que cruces, pongamos por caso, la probabilidad de que los correspondientes números de unas y otras vuelvan en el futuro a ser iguales es 1. Una probabilidad de 1 significa que se trata de una cosa segura, en tanto que una probabilidad de 0 significa que es imposible. (En este caso estamos trabajando con una lista de lanzamientos potencialmente infinita, por lo que los matemáticos prefieren decir "casi seguro" o "casi imposible", respectivamente.)

Existe también un sentido en el cual los lanzamientos de moneda no tienen tendencia al empate a largo plazo. Por ejemplo, al cabo de una serie de 100 caras más que cruces, la probabilidad de que el número acumulado de caras llegue a ser de 1.000.000 más que de cruces es también igual a 1.



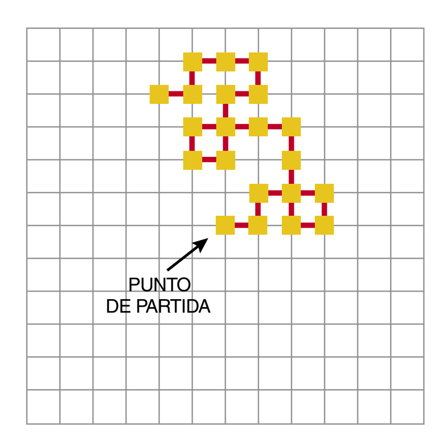


1. Dendrograma que muestra los posibles resultados de cuatro lanzamientos de una moneda

Con el fin de analizar estas aparentes contradicciones, examinemos más de cerca este lanzamiento de monedas. He lanzado una 20 veces, con el resultado XXXXCXCCCC-CCXXXCXXXC, con un total de 11 cruces y 9 caras. Según la ley de los grandes números, las frecuencias relativas con que deberían acontecer los fenómenos tendría que ser, a la larga, muy cercana a su probabilidad. En este caso, las frecuencias son $^{11}/_{20}$ = 0,55 y $^9/_{20}$ = 0,45, valores cercanos a 0,50, pero no iguales a él. Tal vez la serie de mis resultados no parezca suficientemente aleatoria. Tal vez prefiera el lector algo así como CXCCXXCXXCXCCXCXCCXX, en que las frecuencias son de $^{10}/_{20}$ = 0,50 para las caras y para las cruces. Además de hacer los promedios más "exactos", la segunda serie parece más aleatoria que la primera. Pero no lo es.

La primera serie no parece ser muy aleatoria a causa de las largas ristras de sucesos iguales, como XXXX y CCCCCC, de las que la segunda secuencia carece. Pero nuestra intuición nos engaña: es frecuente que las secuencias aleatorias presenten regularidades y acumulaciones. No se deje sorprender por ellas. (A menos que la moneda presente CCCCCC-CCCCCCC... durante mucho tiempo, en cuyo caso podemos pensar, sin mucha picardía, que la moneda tiene cara por ambos lados.)

Supongamos que se lanza cuatro veces seguidas una moneda. La figura 1 resume los resultados posibles. El primer lanzamiento produce, o bien C, o bien X (cada una con probabilidad $^1/_2$). Cualquiera que sea el resultado, el segundo será también C o X. Y así sucesivamente. Para cuatro lanzamientos obtenemos un "árbol" que puede ser recorrido según 16 posibles rutas. Según la teoría de probabilidades, cada ruta tiene probabilidad $^1/_2 \times {}^1/_2 \times {}^1/_2 \times {}^1/_2 = {}^1/_{16}$. Tal resultado es plausible, pues existen



2. *Paseo aleatorio bidimensional*

16 rutas posibles, y todas son igual de verosímiles.

Observemos que XXXX tiene probabilidad $^1/_{16}$, y que CXCC, sea por caso, tiene también probabilidad $^1/_{16}$. Por tanto, aunque CXCC parezca más "aleatoria" que XXXX, ambas series gozan de la misma probabilidad.

Como antes, si se lanza una moneda cuatro veces, por término medio se obtienen dos caras. ¿Significa esto que dos caras y dos cruces son altamente probables? No. En la ilustración 1 existen 16 secuencias distintas de caras y cruces; un total de 6 contienen dos caras: CCXX, CXCX, CXXC, XCCX, XCXC, XXCC. Así pues, la probabilidad de obtener exactamente dos caras es $^6/_{16} = 0{,}375$. Este valor es menor que la probabilidad de no obtener exactamente dos caras, que es de 0,625. Con secuencias más largas, este efecto se vuelve todavía más acusado.

Las investigaciones de esta clase dejan claro que no existe una ley de promedios, en el sentido de que las probabilidades futuras de los sucesos no se ven en modo alguno afectadas por lo acontecido en el pasado. Existe, sin embargo, un sentido interesante en el que las cosas sí tienden a equilibrarse a la larga. Representemos el exceso del número de caras sobre el número de cruces, dibujando un gráfico de la diferencia tras cada lanzamiento. Podemos concebir que esta construcción corresponde a una línea quebrada que se eleva un paso por cada C y retrocede un paso por cada X. Tales diagramas, cuyos sucesivos pasos están determinados por el azar, reciben el nombre de paseos aleatorios.

La figura 3 muestra un paseo aleatorio típico correspondiente a 10.000 lanzamientos. Esta clase de comportamiento tan descompensado es normal. De hecho, la probabilidad de que en 10.000 lanzamientos uno de los bandos lleve la delantera durante 9930 lanzamientos, y el otro durante sólo 70, es del orden de 1 en 10.

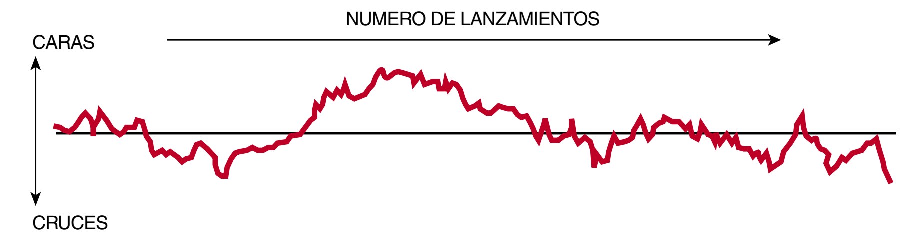
La teoría de paseos aleatorios nos dice que la probabilidad de que el saldo nunca retorne a 0 (es decir, de que C lleve eternamente la delantera) es igual a 0. Este es el sentido en que es verdadera la ley de los promedios, pero nada afirma sobre la posibilidad de aumentar sus probabilidades de ganar si estamos apostando a que va a salir C o a que va a salir X. No se puede saber lo larga que va a ser la tanda, salvo que es muy probable que realmente sea muy larga.

Imaginemos que se lanza 100 veces una moneda y se obtiene 55 caras y 45 cruces, o sea, un desequilibrio de 10 a favor de las caras. En tal caso, la teoría de paseos aleatorios afirma que, si uno espera lo suficiente, el desequilibrio se corregirá por sí solo (con probabilidad 1). ¿Acaso no es esto la ley de los promedios? No, en el sentido en que esta ley se interpreta de ordinario. Si se elige de antemano una longitud de la serie —un millón de lanzamientos— la teoría de paseos aleatorios dice que este millón de lanzamientos no se ve afectado por el desequilibrio. Además, si se hicieran enormes números de experimentos, con un millón de lanzamientos extra en cada ocasión, entonces, por término medio, se obtendrían 500.055 caras y 500.045 cruces en la secuencia combinada de 1.000.100 lanzamientos. Los desequilibrios, en promedio, persisten. Observemos, sin embargo, que la frecuencia de C ha cambiado de $^{55}/_{100} = 0{,}55$ a $^{500.050}/_{1.000.100} = 0{,}500005$. La ley de promedios se afirma a sí misma, no eliminando los desequilibrios, sino anegándolos. (Puede verse más información en *Una introducción a la teoría de probabilidades y sus aplicaciones*, por William Feller; Editorial Limusa, México, 1975.)

En vez de lanzar una moneda, imaginemos ahora que lanzo un dado y que voy contando cuántas veces va saliendo cada una de las caras, de 1 a 6. Supongamos que las caras sean igualmente probables y, por tanto, de probabilidad $^1/_6$. Al empezar, las frecuencias acumuladas de aparición de cada cara son todas iguales, a saber, 0. Lo típico es que al cabo de algunas tiradas dichas frecuencias acumuladas empiecen a diferir. De hecho, son necesarias al menos seis tiradas antes de que exista alguna posibilidad de que se igualen, en cuyo caso se tendría un resultado de cada una. ¿Cuál es la probabilidad de que, por mucho tiempo que siga yo lanzando el dado, las seis frecuencias acumuladas vuelvan a ser iguales? No conozco el valor exacto; he aquí, un hueco que podrían llenar los lectores en Acuse de recibo. En cambio, demostraré que ciertamente no es igual a 1.

En el caso del problema del dado resulta necesario generalizar el paseo aleatorio a mayor número de dimensiones. Por ejemplo, el más sencillo paseo aleatorio en el plano se desarrolla en los vértices de un plano cuadriculado infinito. Un punto parte del origen y va sucesivamente desplazándose un paso, ora al norte, al sur, al este o al oeste, con probabilidad $^1/_2$ en cada caso. El diagrama de la figura 2 representa un camino típico. Un paseo aleatorio tridimensional, sobre una retícula cúbica en el espacio, es muy parecido, pero ahora existen seis direcciones —norte, sur, este, oeste, arriba y abajo— cada una de las cuales tiene probabilidad $^1/_6$.

Se puede demostrar que, en el caso de un paseo aleatorio bidimensional, la probabilidad de que el camino acabe por regresar al origen es igual a 1. Stanislaw M. Ulam (coinventor de la bomba de hidrógeno) demostró que, en tres dimensiones, la probabilidad de que termine el paseo por regresar al origen es de 0,35. (Por tanto, si uno se pierde en el desierto y vagabundea



3. *Un paseo aleatorio en el que "cara" corresponde a un paso hacia arriba, y "cruz", a un paso hacia abajo. La gráfica indica que el número de caras y de cruces sólo muy excepcionalmente son iguales*

al azar, acabará por regresar al oasis; sin embargo, si uno se pierde en el espacio, sólo hay una probabilidad en tres de acabar retornando a la Tierra.)

Supongamos rotuladas las seis direcciones de un paseo aleatorio tridimensional de acuerdo con las caras de un dado: norte = 1, sur = 2, este = 3, oeste = 4, arriba = 5, abajo = 6. Lancemos repetidamente el dado, y vayamos moviéndonos por la retícula en la dirección especificada. En este caso, "regresar al origen" significa obtener el mismo número de unos que de doses, el mismo número de treses que de cuatros, y el mismo de cincos que de seises. La probabilidad de que así acabe por ocurrir es, por tanto, de 0,35. Por tanto, la condición, más estricta, de que todos los números aparezcan exactamente el mismo número de veces ha de tener probabilidad menor que 0,35.

Incluso el más sencillo paseo unidimensional posee muchas peculiaridades que van contra la intuición. Supongamos que se opta por un gran número predeterminado de lanzamientos —un millón— y nos fijamos en si van ganando las caras o las cruces. ¿Qué proporción del tiempo esperaríamos, por término medio, que fueran las caras llevando la delantera? La conjetura natural es 1/2. En realidad, tal proporción es la menos verosímil. Las proporciones más probables son las extremas: las caras llevan prácticamente siempre —o prácticamente nunca— la delantera.

Acuse de recibo

En mayo pedía yo que una botella de Klein fuera cortada a lo largo de una curva diferente, de forma que se obtuviera exactamente una banda de Möbius. He aquí la solución de Alan Bennett —escrita en vidrio:



NEXOS

James Burke

Pura poesía

"Dadme vuestras masas cansadas,
pobres, hacinadas, que anhelan respirar libres..."

Hace poco, mientras leía el poema inscrito en el pedestal de la estatua de la Libertad, pensé en que no pocas veces los planes mejor diseñados se van al traste arrojados por la ley de Murphy. En 1871, Francia acababa de perder una guerra contra Prusia. Iniciaba una etapa de gobiernos de un talante parecido al del reloj de cuco (entrante y saliente, en ritmo horario). En el inestable clima político de ese tiempo, plasmado en un movimiento pendular de la monarquía al terror revolucionario y al republicanismo moderado, los defensores del último se afanaron por encontrar la manera de evitar el regreso de la vieja guardia.

Una estatua gigantesca construida por franceses, dedicada a los ideales republicanos y erigida en el puerto de Nueva York (la puerta de entrada de una nación cuya independencia Francia había apoyado un siglo antes), recordaría a cualquier ciudadano francés que deseara volver a los viejos malos tiempos los lazos entre ambos países y el republicanismo natural francés. Podría parecer un buen plan, pero quince años más tarde los americanos, nada tontos, lo desbarataron. Gracias a Emma Lazarus y su oda a América, grabada en el pedestal del monumento, la estatua de la Libertad ha sido considerada, desde su inauguración en 1886, no tanto un reconocimiento de la deuda para con Francia cuanto una afirmación exclusivamente norteamericana de su política de puertas abiertas para los inmigrantes (incluidos los que huyeran de la persecución en Francia).

El ingeniero que construyó la estatua fue Gustav Eiffel, un tipo monumental donde los haya, con docenas de puentes y acueductos que le recuerdan. Años más tarde convirtió en realidad su sueño, construir la torre más alta del mundo, y lo hizo con la misma estructura ligera de hierro forjado que con tanto éxito había empleado para la estatua. En 1889 terminó su famosa torre, tan alta —se dominaba París desde unos trescientos metros de altura— que se salió del presupuesto. Adelantándose a las críticas, Eiffel diseñó la estructura de suerte que pudiera desmantelarse con facilidad (y a punto estuvo de suceder en 1909, pero la altura de su antena, en la nueva era de la radiotelegrafía, la salvó).

Igual que muchos otros, Eiffel aprovechó la altura de la torre para llevar a cabo experimentos que de otra manera sólo se hubieran podido realizar en globo. Estudió el comportamiento de láminas y estabilizadores durante la caída. Los resultados le parecieron tan esperanzadores, que construyó un túnel de viento a los pies de la torre (y con ello impulsó la aerodinámica). Poco después, el presidente del Aeroclub de Francia observó fenómenos aerodinámicos de caída libre similares y colocó un manómetro en lo alto de la torre para medir la presión de líquidos y gases.



Se vio presionado en esa dirección por cuestiones de frío absoluto. Louis-Paul Cailletet dirigió la fundición de su padre y es posible que buscara la manera de obtener el oxígeno necesario para el nuevo proceso de fabricación de acero de Bessemer. Si el oxígeno estaba lo bastante frío se podía almacenar en forma líquida, más compacta (siempre que se mantuviera frío). En 1877 Cailletet licuó el oxígeno mediante una técnica basada en el descenso de la temperatura de un gas que sigue a un descenso de su presión. Antes de que pudiera informar del acontecimiento, llegó un cable desde Ginebra. Lo remitía un ingeniero de refrigeración llamado Raoul-Pierre Pictet y en él afirmaba que había conseguido lo mismo, sólo que por otra vía. Pictet aprovechó un proceso de cascada, por el que se enfriaban varios gases, cada uno con una temperatura de licuefacción progresivamente más baja. Cada gas enfriaba al siguiente hasta obtener oxígeno líquido.

James Dewar, un escocés que andaba obsesionado por alcanzar el cero absoluto, siguió sus pasos y consiguió en 1898 licuar hidrógeno con esos métodos. A los –259 grados Celsius del hidrógeno líquido, Dewar se encontraba a catorce grados de su gélido objetivo. Al hacer el vacío entre dos capas plateadas de acero o vidrio, Dewar inventó una camisa aislante que mantenía frías las cosas frías (y solucionaba el problema de Cailletet sobre el almacenamiento del oxígeno empleado en la fabricación de acero). Su reputación

de ser lo más avanzado en frío atrajo hacia sí la atención de todo aquel que quisiera comprobar cómo se desarrollaba su proyecto favorito en el interior de una nevera, entre ellos Pierre Curie, recordado por el radio. Dewar le ayudó a investigar el comportamiento del radio y, en particular, los gases que absorbe a temperaturas muy bajas.

Pierre y su esposa, Marie Curie, habían descubierto el radio colocando grandes cantidades de pecblenda en cubas, reduciéndolas por cocción y cuantificando las características resultantes. Observaron que el concentrado cargaba de forma muy leve la atmósfera inmediatamente circundante, tan leve que sólo pudo medirse cuando se empleó cristal piezoeléctrico. El cuarzo y otros cristales piezoeléctricos cambian de forma si se exponen a cargas muy pequeñas, incluso infinitesimales.

Paul Langevin, que fuera ayudante de laboratorio de la pareja durante muchos años, fue un ardiente defensor de los trabajos de los Curie (tan ardiente que luego se convertiría en amante de Marie). Langevin estudió otra peculiaridad de los cristales piezoeléctricos: liberan una carga eléctrica cuando se someten a presión. En 1917 diseñó lo que se conoció como el bocadillo de Langevin: una capa de cuarzo entre dos capas de acero. Si se aplicaba electricidad al cuarzo, cambiaba de forma con regularidad y resonaba.

Colocado en el casco de un barco, la capa externa transmitía al agua una señal ondulante y potente. (Langevin mató a muchos peces en sus experimentos iniciales realizados en tanques de agua.) Al chocar con un submarino enemigo (o con un objeto sólido cualquiera, como un arrecife), el eco devuelto producía vibraciones en la plancha de acero y hacía que el cristal resonara y liberara una carga eléctrica. Esta carga producía el sonido metálico que remedan las películas de submarinos. Sónar.

René-Just Haüy, canónigo de la catedral de Nôtre Dame de París, fue quien realizó el primer descubrimiento sobre el comportamiento de los cristales. Ocurrió en torno a 1802. Considerado fundador de la cristalografía moderna, estudió por qué, cuando golpeaba un cristal, éste tendía a romperse en fragmentos con idéntica forma. Tan impactante labor le reportó honores y posición, pero Haüy vivió frugalmente e invirtió todo su dinero en el trabajo de su hermano Valentin.

Valentin fundó en 1784 el primer instituto para niños ciegos en París. En 1826 Louis Braille se incorporó como maestro y tres años más tarde publicó el sistema de lectura que se usa en nuestros días: seis puntos dispuestos en dos filas de tres cada una que permiten 63 combinaciones con las que cifrar el alfabeto, los signos de puntuación, los números y otros. Samuel Gridley Howe, desde 1832 director de una de las primeras instituciones educativas para ciegos, la Escuela Perkins de Boston, visitaría más tarde la escuela de París.

Julia Ward, esposa de Howe, compuso y publicó un gran himno dedicado a los Estados Unidos: el “Himno de batalla de la República”; el otro es la “Oda a América”.

LIBROS

Metaciencia

Regional

PHILOSOPHICAL LOGIC AND LOGICAL PHILOSOPHY. ESSAYS IN HONOUR OF VLADIMIR A. SMIRNOV. Dirigido por Peter I. Bystrov y Vadim N. Sadovsky. Kluwer; Dordrecht, 1996. **NEW DIRECTIONS IN THE PHILOSOPHY OF MATHEMATICS**. Dirigido por Thomas Tymoczko. Princeton University Press; Princeton, 1998.

PHILOSOPHICAL CONCEPTS IN PHYSICS. THE HISTORICAL RELATION BETWEEN PHILOSOPHY AND SCIENTIFIC THEORIES, por James T. Cushing. Cambridge University Press; Cambridge, 1998. **EUGENE PAUL WIGNER. PHILOSOPHICAL REFLECTIONS AND SYNTHESES**. Edición anotada por Gérard G. Emch. Springer Verlag; Berlín, 1997. **TIME'S ARROWS TODAY**. Dirigido por Steven F. Savitt. Cambridge University Press; Cambridge, 1997.

GERHARD HEBERER (1901-1973). SEIN BEITRAG ZUR BIOLOGIE IM 20. JAHRHUNDERT, por Uwe Hossfeld. VWB-Verlag für Wissenschaft und Bildung; Berlín, 1997. **THIS IS BIOLOGY**, por Ernst Mayr. The Belknap Press; Cambridge, 1997. **PHILOSOPHIE DE LA BIOLOGIE**, por François Duchesneau. Presses Universitaires de France; París, 1997.

La filosofía de la ciencia estudia los criterios objetivos que garantizan la validez de una teoría, para ocuparse luego del progreso del conocimiento. Hans Reichenbach y Rudolf Carnap, entre los iniciadores del rumbo neopositivista de la filosofía en la primera mitad del siglo, quisieron asentar los criterios sobre modelos matemáticos. Pero los formalismos resultantes, se vio muy pronto, tenían poco que ver con la realidad de la creación científica.

Una teoría debe presentarse en forma axiómatica, responder a las reglas de la lógica de predicados de primer orden con identidad y someterse a una interpretación empírica. Constituye, pues, un sistema formal tejido por símbolos, primitivos unos y derivados otros. En cuanto formal, el sistema puede definirse sin remitir a la interpretación empírica. Si a esa dimensión sintáctica se agrega, mediante funciones de correspondencia, la dimensión semántica de la interpretación del modelo, los enunciados se convierten en leyes universales.

Pese al recelo que los investigadores muestran de los constructos metateóricos de los filósofos, no es infrecuente que reflexionen en voz alta sobre la naturaleza de su quehacer. Dicho de otro modo, la filosofía de la ciencia tiene muchas manifestaciones, unas sistemáticas otras dispersas. Unas apuntan a lo general, así en *Philosophical Logic and Logical Philosophy*, que homenajea a Vladimir Aleksandrovich Smirnov; otras se mueven dentro de zonas limitadas.

Entre los méritos de Smirnov no fue el menor su esfuerzo por vincular lógica y metodología a través de los modos generales de inferencia, estructuras ontológicas y aspectos computativos. Smirnov, que empezó dando clases de filosofía y lógica en la Universidad de Tomsk, pasó la mitad de su vida entre el Instituto de Filosofía de la Academia de Ciencias de la URSS y en la Universidad estatal de Moscú. Publicó dos libros importantes —*Deducción formal y cálculos lógicos* y *Métodos lógicos de análisis de las teorías científicas*—, representativos del alto nivel de la escuela rusa de lógica.

Smirnov propuso soluciones no estándar a problemas relacionados con la interconexión entre niveles empíricos y niveles teoréticos del conocimiento. En el desarrollo de teorías empíricas, sostuvo, intervienen operaciones genético-constructivas, en las que el razonamiento toma la forma de experimento mental.

Los filósofos de la matemática de los últimos quince años han tomado por libro de cabecera *New Directions in the Philosphy of Mathematics*, reflexiones antológicas de Hersh, Lakatos, Thom, Putnam, Goodman y Chaitin, entre otros, que ahora se amplía con las aportaciones de Michael Resnik, William Thurston y Penelope Maddy. Estos abordan, respectivamente, la verdad, la comprensión y la evaluación en matemática, trío que se resume en uno: la naturaleza de la prueba.

"¿Es verdad que V = L?", se titula el ensayo de Maddy. Aconseja a matemáticos y filósofos que acepten la existencia de otras fuentes de conocimiento más allá de la prueba. Quien admita la prueba como fuente de conocimiento habrá de aferrarse a los axiomas matemáticos. Pero, ¿cómo conocemos los axiomas matemáticos? Los platónicos dicen que por intuición mistérica; los convencionalistas, por opción arbitraria (estipulación). Para Maddy, por criba probabilística.

A la cuestión que Resnik aborda —¿por qué una prueba ofrece a los matemáticos una buena razón para creer que el teorema probado es *verdadero*?— debe dársele una respuesta realista, no trascendental al estilo platónico. Dicho de otro modo, para entender una prueba hemos de entender asertos sobre objetos matemáticos, por mínima o inmanente que sea su realidad. Toma el ejemplo sencillo del teorema euclideano sobre números primos.

El ensayo de Thurston, uno de los más sugestivos de esta antología, pugna con la tesis establecida según la cual propio de la matemática es demostrar teoremas. Para él, importa más profundizar en la comprensión humana de la matemática. Otro reto que Thurston plantea a filósofos y matemáticos es que pongan en claro la noción de prueba rigurosa. Las escuelas fundacionales suelen aportar definiciones —es decir, una prueba formal en PM o en ZF—, pero tales definiciones son virtualmente irrelevantes a la hora de juzgar pruebas reales. ¿Cuándo es rigurosa una prueba? Cuando cada etapa se explica. Thurston se muestra radical: las pruebas dependen esencialmente del contexto. Gödel avisó de que no podían tomarse por pruebas meros constructos sintácticos. Thurston parece sugerir que ni siquiera constructos semánticos. Las pruebas ya no son descripciones absolutas o algoritmos, sino objetos contextualizados relativos al enunciante y al público, lo que se ha considerado tradicionalmente el terreno de la pragmática.

Podría asistirles la razón a quienes conceden que sólo puede elaborarse

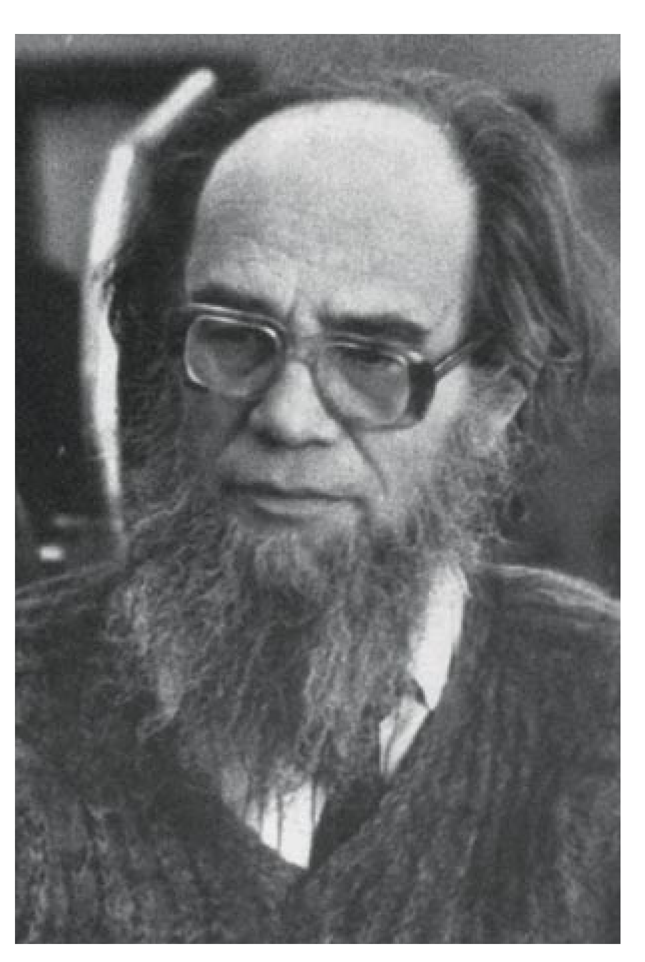
una filosofía de la ciencia sólida en el marco histórico. Además, en filosofía de la física mostrado está que la lógica, por sí sola, no incrementa un ápice nuestro conocimiento de la naturaleza. Todo conocimiento de la realidad comienza con la experiencia o la observación y termina con ellas. Sobre esos raíles corre el volumen exigente de James T. Cushing *Philosophical Concepts in Physics*.

Por supuesto, sin lógica no hay ciencia. El razonamiento deductivo, que reviste múltiples formas, en física recurre en muchísimos casos a las proposiciones hipotéticas ("Si *p*, entonces *q*") . En esa argumentación, cuando se cumple la condición, se satisface la consecuencia y cuando el consecuente no acontece, tampoco el antecedente. Pero el cumplimiento del consecuente no exige que acontezca el antecedente. Sea por caso la aseveración siguiente: "Si la ley newtoniana de la gravitación es por la que se gobierna un planeta en órbita alrededor del sol, entonces la trayectoria dibujada por el planeta es una elipse". Aceptemos que las trayectorias de los planetas sean elípticas. ¿Quiere ello decir que validan la ley newtoniana de la gravitación? En absoluto, puesto que podría deberse a otro fenómeno el que los planetas se mantuvieran en esa órbita.

Amén de lógica y pruebas empíricas, la ciencia necesita sobre todo teorías que expliquen los fenómenos observados. Karl Popper declaraba que lo notable de una teoría no era que pudiera verificarse sino que pudiera refutarse o falsarse. Sólo las teorías relativas a la naturaleza son falsables. Aunque el método hipotético-deductivo no demuestra que una teoría sea necesariamente correcta, nos da una garantía para aceptarla (siempre de un modo provisional).

En física describimos un sistema en función de su estado. Especificamos las magnitudes pertinentes o variables y luego utilizamos leyes dinámicas para determinar la evolución con el tiempo de estas variables. Por ejemplo, en la mecánica clásica de partículas, el estado de un sistema viene especificado por las posiciones y velocidades de todas las partículas del sistema. Es decir, el propio estado viene especificado por variables observables de la teoría. Frente a esa situación, el estado (vector de estado o función de onda) de un sistema cuantico-mecánico es un objeto mucho más abstracto y no es directamente observable.

Ha sido la mecánica cuántica fecunda en físicos con una poderosa



Vladimir Aleksandrovich Smirnov (1931–1996)

mente filosófica. Recuérdese, sin ir más lejos, a Schrödinger, impulsor de la metabiología moderna, o las páginas de Heisenberg y Jordan sobre la creación. A esa raza pertenece Eugene Paul Wigner y sus reiterativas *Philosophical Reflections*.

A Wigner le interesa sobre todo el proceso de medición cuántica, que le lleva la cuestión de la conciencia y su papel en la reflexión del físico. De acuerdo con von Neumann, London y Bauer, autores de las formulaciones más compactas y explícitas de la estructura conceptual de la mecánica cuántica, cada medición es una interacción entre el objeto y el observador. Wigner apostilla que, en efecto, el estado del objeto puede describirse mediante un vector de estado (una función de onda); ahora bien, el objeto no puede ser el universo entero porque, al menos, el observador no está incluido. El objeto obedece las leyes del movimiento (ecuación de Schrödinger) en tanto en cuanto sea un sistema cerrado, es decir, separado del mundo. Podemos suponer que tal es el caso durante los intervalos entre mediciones. No lo es evidentemente cuando se procede a una medición, porque ésta es una interacción entre el objeto y el observador.

Para Wigner, la cadena de transmisión de información del objeto a la conciencia del observador podría constar de varias etapas. Podrían éstas reconstruirse con mayor o menor detenimiento. Pero no se puede llevar la transmisión de información hasta sus últimas consecuencias, es decir, hasta la conciencia del observador porque la física de nuestros días no abarca la conciencia.

Existen, pues, dos tipos de realidad: mi conciencia y todo lo demás. Dicha dualidad se presenta cuando el resultado de una observación entra en la conciencia del observador o, con mayor precisión, en mi propia conciencia, puesto que soy el único observador, siendo las demás personas objeto de mis observaciones.

Superpónese a la reflexión del físico, la del filósofo. También en el caso de cierta entidad sutil que dice relación con la experiencia del sujeto, la flecha del tiempo. Cortemos, para mejor comprenderlo, la última presentación de *Time's Arrows Today. Recent Physical and Philosophical Work on the Direction of Time*. Para resolver los interrogantes que la asimetría y direccionalidad plantean, deben abordarse cuestiones espinosas de metaciencia: ¿Pueden los efectos preceder a las causas? ¿Puede viajarse en el tiempo? ¿Puede la expansión del universo o el proceso de medición en mecánica cuántica aportar una dirección del tiempo?

De los once firmantes, los dedicados a la filosofía harán bien en detenerse en las páginas de Lawrence Sklar, que parte con una larga bibliografía en sus alforjas: *Space, Time, and*

Spacetime, *Philosophy and Spacetime Physics*, *The Philosophy of Physics* y *Physics and Chance: Philosophical Issues in the Foundations of Statistical Mechanics*.

Según parece, la expresión "flecha del tiempo" la introdujo en 1928 Arthur Eddington. Designa un proceso o fenómeno físico que presenta un sentido definido en esa variable; en el fenómeno no se produce el proceso de inversión temporal. Eddington pensó que había hallado esa flecha en el aumento de la entropía de sistemas aislados. "La ley de que la entropía siempre crece —segunda ley de la termodinámica— ocupa, eso pienso, el lugar supremo entre las leyes de la Naturaleza."

Con los años fueron multiplicándose los campos de aplicación de las flechas del tiempo: 1) la desintegración del mesón neutro K parece gobernado por una ley de asimetría temporal, la única ley de ese tipo en física; 2) el proceso de medición en mecánica cuántica, junto con su acompañante "colapso de la función de onda", se considera un fenómeno de asimetría temporal; 3) la segunda ley de la termodinámica afirma que en los procesos irreversibles la entropía de sistemas aislados crecerá hasta alcanzar un valor máximo; 4) la radiación emitida de fuentes puntuales de capas esféricas se expande en la dirección del tiempo; 5) la dirección del tiempo se experimenta en el ánimo del sujeto; 6) la expansión del universo explica la flecha termodinámica, y 7) de acuerdo con la teoría general de la relatividad, el colapso gravitatorio de una estrella dotada de masa suficiente resulta en un agujero negro. Sklar se instala en la perspectiva de la mecánica estadística, en las interpretaciones de Krylov y, sobre todo, en el programa de Prigogine, que privilegian las condiciones iniciales como determinantes de lo que será el sistema.

Desde su nacimiento, la teoría darwinista —y muy pronto otras teorías biológicas— se vieron envueltas en polémicas que sobrepasaban los confines de la observación empírica para enzarzarse en supuestas inferencias filosóficas, que no decían estricta relación ni con la ciencia ni con la metaciencia, sino con la ideología de quienes militaban en bandos antagónicos. La eugenesia y el racismo fueron dos aspectos de un mismo propósito, edulcorado obviamente con propósitos de mejora de la sociedad y su felicidad.

El racismo nacionalsocialista hundió sus fundamentos biológicos en el darwinismo germano de la escuela de Haeckel y halló su paladín en uno de los creadores de la versión alemana de la nueva síntesis. Lo relata Uwe Hossfeld en su obra de grado *Gerhard Heberer (1901-1973). Sein Beitrag zur Biologie im 20. Jahrhundert*. Heberer, que aclaró la espermatogénesis de los copépodos en un estudio a largo plazo realizado sobre todo en Nápoles, alternó su investigación sobre la teoría cromosómica de la herencia con la doctrina de la evolución y la antropología germánica. Su afiliación a las SS rubricaba la orientación que había dado a sus estudios: a través de procesos de selección y mutación, mostrábase la superioridad genética de la "raza nórdica".

Expuso su pensamiento en *Rassengeschichtliche Forschungen im indogermanischen Urheimatgebiet* (Investigaciones raciológicas sobre el primitivo suelo indogermano). Rechazaba los orígenes asiáticos y euroorientales de la raza nórdica y consideró demostrado que ésta surgió en la Alemania central y septentrional. Los primitivos representantes de la raza nórdica dieron origen a los pueblos proto-indo-germanos del Mesolítico, que a su vez engendraron los pueblos indogermanos del Neolítico, o nórdica. Corroboraba esa entelequia con referencias a la cerámica descubierta y a consideraciones lingüísticas.

La historia prefiere recordar su aportación neodarwinista del año 1943 en el volumen colectivo que dirigió, *Die Evolution der Organismen*. En su ensayo Heberer defendía que los factores de la microevolución —mutación, selección y aislamiento— podían explicar la macroevolución.

La teoría sintética la había perfilado ya en 1937 Theodosius Dobzhansky con su *Genetics and the Origin of Species*, donde se recogía y engarzaba el progreso obtenido en genética con los avances de la historia natural. Una vez más, Ernst Mayr se autoproclama pionero de dicha tesis en *This is Biology* con sus descripciones



Mantillo foliar, de Michael Rothman

en 1942 de la noción de especie y de especiación.

Contrarresta Mayr sus carencias en historia de la filosofía y de la ciencia anterior al siglo XIX con un don importante, la claridad. Resulta llamativo cómo se le despertó su vena inquisitiva más allá de la sistemática. Según cuenta, el origen de la migración de las aves le induce a cuestionarse por la función de causa. A su vez, esta categoría le sirve para deslindar el mundo orgánico del inorgánico. Ambos mundos obedecen las leyes universales descubiertas y analizadas por las ciencias físicas, pero los organismos obedecen también un segundo conjunto de causas, las instrucciones procedentes del programa genético. Los organismos forman una jerarquía de sistemas cada vez más complejos, desde moléculas hasta poblaciones y especies. En cada sistema superior emergen propiedades que no podrían preverse a partir del conocimiento de los componentes.

Repudia el reduccionismo. Rechaza el esencialismo, según el cual habría en la naturaleza tipos fijos (clases) invariantes. Contra Thomas Kuhn, cuestiona que pueda hablarse en biología de ninguna revolución para explicar su progreso histórico. Todos esos deslindes le conducen hacia la autonomía de la biología. Esta difiere de la física en su objeto, en su historia, en sus métodos y en su filosofía.

Tema central e inconcluso de la biología y su reflexión metacientífica es el de la vida y sus propiedades. Desde muy pronto se dibujan dos corrientes fundamentales antagónicas: mecanicista y vitalista. Para los fisicalistas, o mecanicistas, los organismos no diferían de la materia inanimada. Para los vitalistas, los organismos tenían propiedades que no podían hallarse en la materia inerte.

Mayr abraza una tercera vía, la que dice tomar lo mejor de las anteriores enfrentadas. El organicismo, u holismo como también se llama, acepta que los procesos moleculares son mecanismos físicoquímicos, aunque éstos desempeñan un papel cada vez menor, si no despreciable, en niveles de integración superiores. Les sustituyen propiedades emergentes de los sistemas organizados.

A la especie —unidad de tipo y unidad de evolución— le consagra largas páginas François Duchesneau en su revisión de lo que hoy se entiende por *Philosophie de la biologie*. De acuerdo con un patrón algo anticuado retoma la noción biológica de especie establecida por Mayr, o población natural que mantiene su aislamiento reproductor. La noción evolutiva de especie, avanzada por Simpson y renovada por Edward Wiley, atiende a la dimensión temporal; define el tipo manifestado desde su aparición tras un proceso de especiación hasta su extinción. En la dimensión espacial insiste la descripción ecológica que da Leigh van Valen: la especie es el linaje que ocupa una zona adaptativa propia y sigue su propia pauta de evolución.

Esas y otras definiciones de especie determinan modelos taxonómicos diferentes. Para la escuela fenética, que sigue el programa de taxonomía numérica de Sneath y Sokal, debe operarse con un número elevado de caracteres si hemos de plasmar relaciones de afinidad, jerarquía y parentesco. Por su parte el cladismo instaurado por Willi Hennig reproduce, en configuración arborescente, la estructura de los grupos monofiléticos, donde por grupo monofilético se entiende la forma ancestral y sus descendientes. Biólogos y epistemólogos defienden, en general, cierto relativismo metodológico, que pueda acomodarse en su flexibilidad al distinto nivel y objeto de investigación.

No acaba de encontrar la filosofía de la biología su núcleo duro cuya formalización permita cribar la validez de sus teorías. Algunos se afanan por establecer un sistema formal a partir de la ley de Hardy-Weinberg sobre mantenimiento de las frecuencias de los alelos en una comunidad panmíctica. Otros se centran en la formalización de la selección natural.

LUIS ALONSO

Ecología

Global

GAIA'S BODY. TOWARDS A PHYSIOLOGY OF EARTH por Tyler Volk. Copernicus—Springer Verlag; Nueva York, 1998.

Un libro que podría desconcertar al lector. Se une a los muchos discursos sobre Gaia que circulan con suerte diversa, y hasta se permite ampliar su trato personal a otras divinidades de diversas culturas. Recuerda los apellidos de la nobleza española, como ejemplo de denominaciones múltiples o prolijas, y esto por tres veces, de manera que se puede dar por verdad sabida. Pero lo bueno es que entre algunas divagaciones triviales que, como se puede imaginar, se sitúan principalmente al principio y al fin del libro, se extiende un contenido enjundioso, que contrasta con algunos otros discursos en encomio de la diosa de la Tierra. No se puede decir que Gaia evolucione, pero es la matriz de una vida que evoluciona. No en vano este libro ha merecido una mención muy honorable en las páginas de un número reciente de *Nature*, que puede verse como señal de la aprobación de otra divinidad con más pretensiones de influencia en el mundo actual de la ciencia.

Para Volk la vida es como la piedra filosofal, ilumina lo que toca y nos ha de dar una clave del mundo. Explica con gran claridad la asimilación vegetal y los mecanismos de la producción marina, con un examen crítico y bien meditado de sus factores limitantes. Me ha complacido ver que acepta al fósforo como limitante principal, en una época en la que muchos oceanógrafos parecen excesivamente ilusionados con una función decisiva del nitrógeno o del hierro. La exposición del mecanismo de la fotosíntesis es clara y cuidada con un canto especial a la naturaleza y funciones de la enzima RUBISCO. En esta parte resulta innegable su entusiasmo por el oficio, que le mueve al uso de expresiones felices y a una exposición particularmente clara. He leído con satisfacción que acepta el concepto de energía incorporada y reconoce que, en la vida continental, la celulosa y la lignina colaboran en la construcción de un sistema muy eficiente de la utilización de la luz, que apura más el provecho que se puede obtener de cada unidad de fósforo.

Las figuras esquemáticas, a pesar de haberse realizado con las técnicas modernas, y quizá por esto, son francamente feas. No apabulla con referencias bibliográficas, que están bien seleccionadas entre aportaciones modernas relevantes. En resumen, se trata de un excelente texto de ecología global que explora puntos de vista selectos, con una mayor carga científica en el área de la producción primaria, especialmente acuática, aunque no olvida los problemas cotidianos de nuestro entorno, en relación con los cuales la idea de Gaia puede ser una llamada al sentido de responsabilidad y aun de amor, si no al sentido común.

RAMÓN MARGALEF

Seguiremos explorando los campos del conocimiento



UN CALCULO DEL RIESGO, por Gary Stix

La ingeniería financiera tanto puede reducir los riesgos que entraña la gestión de una multinacional como los de una modesta economía familiar. Los modelos matemáticos utilizados por esta disciplina pueden, empero, presentar un nuevo conjunto de riesgos.

SEIS MESES EN LA MIR, por Shannon W. Lucid

Veterana astronauta de la NASA, Lucid pasa revista al programa Lanzadera-Mir cuando se acerca a su fin. Se apoya en sus experiencias para anticiparse a los problemas que podrá plantear la Estación Espacial Internacional.

GEOMETRIA DEL TEMPLO JAPONES, por Tony Rothman

Durante el período en que Japón se mantuvo voluntariamente aislada de Occidente, entre 1639 y 1854, quedaron cercenadas todas las formas de cultura europea. Surgió entonces un movimiento matemático autóctono que tiene su exponente en los sangaku, unas tablillas de madera portadoras de problemas geométricos.

UN NUEVO BRILLO EN LAS PANTALLAS DE TELEVISION, por Alan Sobel

La pantalla de representación por plasma cumple al fin una promesa mantenida durante décadas: una pantalla grande y luminosa que por su grosor pueda colgarse de la pared como si se tratara de un cuadro. Pero su difusión requiere que se abaraten los precios.

GENETICA DE LA CAPACIDAD Y DISCAPACIDAD COGNITIVA, por Robert Plomin y John C. DeFries

Gracias a las investigaciones realizadas sobre las habilidades cognitivas comenzamos a conocer los genes que determinan los componentes de nuestras facultades intelectuales.

EL CANTO DE LA CIGARRA, por Henry C. Bennet-Clark

Diríase que el más ruidoso de los insectos, la cigarra macho, ha sido diseñado para cantar. Su instrumento interno reviste una sorprendente complejidad.

YA ESTA AQUI LA TELEVISION DIGITAL, por Jae S. Lim

Tras un largo y discutido proceso, por fin se dispone de un estándar digital. Pronto sustituirá al anticuado sistema de televisión actual.

EL ONCOGEN VAV, por Xosé R. Bustelo, Silvio Gutkind y Piero Crespo

La proteína Vav, tumorigénica, participa en los procesos de transmisión de señales que tienen lugar tras la activación de las células hematopoyéticas.

INVESTIGACION y CIENCIA